

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky



Pevnostní výpočet klece zábavního zařízení

Stress Analysis of Entertainment Machinery Cage

Student:

Martin HANÁK

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej FRANTIŠEK

Ostrava 2011

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Hanák**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika  
Téma: **Pevnostní výpočet klece zábavního zařízení**  
**Stress Analysis of Entertainment Machinery Cage**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická rešerže statické úlohy řešené metodou konečných prvků
2. Popis zařízení
3. Technické požadavky na klec zábavního zařízení
4. Schéma navržené klece
5. Pevnostní a tuhostní kontrola pomocí metody konečných prvků

Seznam doporučené odborné literatury:

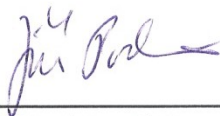
- [1] VINOGRADOV, O. *Fundamentals of Kinematics and Dynamics of Machines and Mechanisms*. London: CRC Press, 2000
- [2] COOK, D. *Finite Element Modeling for Stress Analysis*. 1st printing. United States of America: John Wiley & sons, Inc., 1995. 320 s. ISBN 0-471-10774-3
- [3] KOLÁŘ, V; NĚMEC, I; KANICKÝ, V. *FEM - Principy a praxe metody konečných prvků*. 1. vyd. Praha: Computer Press, 1997. 401 s. ISBN 80-7226-021-9
- [4] ANSYS, Inc. *ANSYS Release 12.0 Documentation*. 2009. Dostupné v elektronické podobě jako součást softwaru ANSYS 12.0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej František**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

## Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji že,

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo, bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Martin HANÁK

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Na Veselé 2262, 738 01 Frýdek-Místek

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

HANÁK, M., *Pevnostní výpočet klece zábavního zařízení: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2011, 83 s. Vedoucí práce: František, O.

Bakalářská práce se zabývá pevnostní a tuhostní kontrolou klece zábavního zařízení typu STREET FIGHTER. V úvodu je teoretická část popisující statickou úlohu v metodě konečných prvků a také je naznačen princip sestavení globální matice tuhosti pro celé konstrukce. V další části je popsáno samotné zábavní zařízení v přepravním demontovaném stavu, ve smontovaném stavu a jsou rozebrány jednotlivé provozní stavy zábavního zařízení. Dalším dílčím krokem je stanovení požadavků, jež jsou kladené na klec zábavního zařízení. Podle tohoto je navrženo vlastní schéma atrakce a následně sestaven model klece zábavního zařízení. Tento model je podroben pevnostní a tuhostní kontrole pomocí programu ANSYS Workbench 13.0. Během analýzy se vyskytl problém s uchycením gondol ke kyvnému rameni, proto bylo navrženo několik různých variant tohoto uchycení, z těchto bylo vybráno optimální řešení, které už bylo vyhovující.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

HANÁK, M., *Stress Analysis of Entertainment Machinery Cage*  
: *Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of mechanic, 2011, 83s. Thesis head: Ondřej, F.

This thesis deals with the strength and stiffness control of the car entertainment devices such as STREET FIGHTER. The introduction describes the static part of the theoretical problems in the finite element method and the principle outlined build a global stiffness matrix for the structure. The next section is described the entertainment facilities in the transport disassembled, assembled in the state and is focused on different operating states of the entertainment device. The next step is to determine the individual requirements that are placed on the car entertainment devices. Under this scheme is designed to own attractions, and then built a model car entertainment devices. This model is subjected to strength and stiffness control help ANSYS Workbench 13. During the analysis, there was a problem with the attachment of gondols to Mount swinging shoulder, so there were proposed several options of the fit, the optimal solution was chosen, which has been satisfactory.



Chtěl bych poděkovat vedoucímu své bakalářské práce, Ing. Ondřeji Františkovi, za rady, připomínky a za čas, který mi věnoval, za vedení pro zpracování tohoto zajímavého tématu mé bakalářské práce

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	7
Úvod.....	9
1. Teoretická řešerše statické úlohy řešené metodou konečných prvků.....	10
1.1 Trojúhelníkový prvek.....	13
1.2 Čtyřstěnový prvek.....	15
2. Popis zařízení.....	19
2.1 Parametry v různých polohách.....	22
3. Technické požadavky na klec zábavního zařízení.....	26
4. Schéma navržené klece.....	27
5. Pevnostní a tuhostní kontrola pomocí metody konečných prvků.....	35
5.1 Geometrický model.....	35
5.2 Diskretizace modelu.....	36
5.3 Zatížení.....	38
5.4 Okrajové podmínky.....	38
5.5. Modální analýza.....	41
5.6 Výsledky pro různé polohy.....	43
5.6.1 První pozice - výchylka $0^\circ$ .....	43
5.6.2 Druhá pozice – výchylka $30^\circ$ .....	47
5.6.3 Třetí pozice – výchylka $60^\circ$ .....	50
5.6.4 Čtvrtá pozice – výchylka $90^\circ$ .....	53
5.6.5 Pátá pozice – výchylka $120^\circ$ .....	56
5.7 Zhodnocení výsledků.....	60
5.8 Návrh uložení gondol ke kyvnému rameni.....	62
5.8.1 Zatížení.....	62
5.8.2 Okrajové podmínky.....	63
5.8.3 Výsledky odlišných variant návrhu uchycení.....	63
5.9 Konečný návrh uchycení gondol ke kyvnému rameni.....	72
5.8.1 Geometrický model.....	72
5.8.2 Diskretizace modelu.....	73
5.8.3 Zatížení.....	75
5.8.4 Okrajové podmínky.....	76
5.10 Zhodnocení výsledků prostorového modelu uchycení gondol ke kyvnému rameni.....	81
Závěr.....	82
Seznam použité literatury.....	83

## Seznam použitých značek a symbolů

Malá písmena latinské abecedy		
Označení	Jednotka	Popis významu
b	mm	Šířka
h	mm	Výška
r	mm	Vektor zobecněných posuvů v uzlech
u	mm	Vektor zobecněných uzlových posuvů
k	N/mm	Lokální matice tuhosti
l	mm	Délka
v	mm	Vektor uzlových posuvů
	m/s	Výška Rychlost koncového bodu ramena
w	mm	Vektor uzlových posuvů

Tabulka 1 - malá písmena latinské abecedy

Velká písmena latinské abecedy		
Označení	Jednotka	Popis významu
A		Matice relací
B	mm	Šířka
C		Matice materiálových konstant
E	MPa	Youngův modul pružnosti v tahu
F	N	Matice sil
G		Transformační matice
H	mm	Výška
K	N/mm	Globální matice tuhosti
L	mm	Délka
M		Matice báзовých funkcí
N		Matice tvarových funkcí
S	mm <sup>2</sup>	Průřez;
T <sub>k</sub>	s	Perioda kyvu
T <sub>R</sub>	s	Perioda otáčení klece

Tabulka 2 - velká písmena latinské abecedy

Malá písmena řecké abecedy		
Označení	Jednotka	Popis významu
$\alpha$	mm	Vektor zobecněných souřadnic
$\alpha_k$	°	Výchylka kyvného ramene
$\beta$	°	Úhel
$\partial$		Operátorová matice
$\mu$		Poissonova konstanta
$\sigma_{oC}$	MPa	Mez únavy v ohybu
$\omega_k$	min <sup>-1</sup>	Kruhová frekvence kyvného ramene
$\omega_r$	min <sup>-1</sup>	Kruhová frekvence klece

Tabulka 3 - malá písmena řecké abecedy

## Úvod

V dnešní době existuje v Evropě několik desítek firem zabývajících se výrobou zábavních atrakcí, mezi největší evropské producenty jmenujme například Technical park – Itálie, KMG – Nizozemsko a HUSS – Německo. U nás je největší producent těchto atrakcí firma KOLMAX-plus s.r.o, avšak nabídka této firmy je velice úzká, neboť se velice úspěšně věnovala výrobě a vývoji atrakce Lavice, kterou vyvážela do deseti evropských zemí a dvě atrakce se nyní provozují i ve Spojených arabských emirátech. Tyto firmy používají jen certifikované kvalitní materiály a výrobky s vědomím, že kvalita znamená zajištění bezpečnosti, kterou tito výrobci staví na první místo. Všechny jejich výrobky musejí být v souladu s mezinárodními normami ISO, DIN, atd. a musejí být certifikovány společnostmi TÜV SÜD.

Snad největší překážkou českých provozovatelů zábavních zařízení je finanční nedostupnost atrakcí zahraničních firem a také to, že čeští výrobci nemají dostatečnou nabídku na poptávku trhu. Proto bych se v této práci chtěl zaměřit na základní návrh a výpočet klece atrakce STREET FIGHTER, kterou vyrábí pouze výše jmenovaná firma Technical park a nabídnout ji českým výrobcům k začlenění do svého plánu výroby.

Cílem práce bude návrh klece zábavního zařízení, respektive návrh součástí jako jsou sedačky, trubky, na které jsou namontované sedačky a která je též připevněna k nosnému rameni. Tento celek se nazývá gondole. Cílem tohoto návrhu bude také návrh optimální tloušťky jednotlivých stěn. V práci nebude modelován zádržný systém, polstrované ergonomické sedačky ani reklamní osvětlení. Tyto součásti však budou brány v úvahu při zadávání zatížení, respektive při zadávání hmotnosti hmotných bodů. Také však bude brán zřetel na prostorovou náročnost klece zábavního zařízení. Navržená klec bude podrobena pevnostní a tuhostní kontrole.

Vzhledem k rozsáhlosti a náročnosti práce, došlo k rozdělení na dvě samostatné. První částí je „Pevnostní výpočet nosného ramene zábavního zařízení“, jejímž řešitelem je Jiří Hanák viz [4] a na tuto druhou část mající název „Pevnostní výpočet klece zábavního zařízení“.

## 1. Teoretická rešerše statické úlohy řešené metodou konečných prvků

Podstata metody konečných prvků spočívá v rozložení výpočtového modelu na menší myšlené části, které nazýváme konečnými prvky. Prvek nebo také jiným názvem element má konečné rozměry. V technické praxi rozlišujeme oblast jednorozměrnou, do které zařazujeme například nosníky, rámy, příhradoviny, mřížoviny a podobně. Další oblastí je oblast dvojrozměrná, do které patří stěny, desky a skořepiny. Poslední oblastí je oblast trojrozměrná, sem patří takzvaný solid prvek. Analýza pomocí metody konečných prvků tedy vyžaduje rozdělení modelu na konečný počet prvků, které mezi sebou mají zajištěnou dostatečnou interakci, tedy aby opět tvořili souvislý celek a byla zajištěna rovnováha a kompatibilita modelu.

Dále je zapotřebí jednoznačně definovat zatížení a uložení. Zatížení vyvolávají běžná břemena a momenty, které jsou buď soustředěny v bodech anebo působí spojitě. Uložením rozumíme přesně definované okrajové podmínky. Ve své podstatě jde o omezení stupňů volnosti modelu. Po stanovení těchto podmínek se vypočítají neznámé deformační nebo silové faktory, tyto se nejprve vypočítají na hranicích jednotlivých elementů, následně i uvnitř elementu. Vícedimenzionální modely se oproti jednodimenzionálním modelům nestýkají v bodech, ale ve stykových hranách, popřípadě ve stykových plochách. Tím však vzniká problém, že skutečný počet stykových bodů není konečný.

Metoda konečných prvků má tři důležité kroky. Prvním krokem je rozložení modelu konstrukce na jednodušejší popsateľné konečné prvky. Tuto metodu rozdělování podvědomě používáme například při výpočtech obsahů složitých geometrických útvarů rozložením na dílčí útvary, které jsou lépe matematicky popsateľné. Tvar prvků pro rovinnou konstrukci je obdélníkový, dále také prvky se zakřivenými hranami, ale nejčastěji používaný prvek je trojúhelníkový. Vzhledem k derivacím lineárních básových funkcí jsou průběhy napětových i deformačních složek po prvcích konstantní, tudíž na hranicích mezi prvky nespojitě. V místech s velkými gradienty je proto nutné významně zvětšit počet těchto prvků, aby pozdější výsledky byly správně interpretovány z hlediska posouzení životnosti a pevnosti konstrukce. Trojúhelníkový prvek se používá často, ale vzhledem k již zmíněným konstantním průběhům není tolik přesný. Pro trojrozměrné úlohy se používají čtyřstěny, pětistěny, šestistěny a podobně. Prvky ve tvaru prstence se používají při řešení rotačně symetrických úloh. Rozdělení konstrukce na prvky značně ovlivňuje kvalitu přesnosti řešení, je proto velmi důležité věnovat této problematice značnou pozornost. Při tomto definování konečných prvků hraje významnou roli zkušenost a intuice

výpočtáře. Je však nutné mít na paměti, že stále platí skutečnost, že čím jemnější a pravidelnější síť, tím jsou dosažené výsledky přesnější. Druhým krokem je definování tuhosti respektive poddajnosti prvku. Je zřejmé, že každý prvek vzdoruje deformaci podle svých fyzikálních, ale také geometrických vlastností. Pro toto posouzení používáme matici tuhosti prvku při použití deformační varianty, případně matici poddajnosti při použití silové varianty. Matice tuhosti se relativně snadno sestavují pro jednorozměrné elementy, pro vícerozměrné elementy se matice tuhosti musí exaktně odvodit. Většinou se volí náhradní funkce, které přibližně odpovídají silám nebo posunutím sousedních prvků. Vhodnost náhradních funkcí významně ovlivňuje přesnost řešení. Posledním třetím avšak neméně důležitým krokem je analýza konstrukce. Ve své podstatě je tento krok totožný se stanovením matice tuhosti respektive poddajnosti celé konstrukce. Jednotlivé matice tuhosti elementů  $[k]$  se transformují z lokálního souřadného systému elementu do globálního souřadného systému celé konstrukce  $[K]$ . Tento lokalizační princip bude na jednoduchém příkladě popsán níže.

Statická úloha v metodě konečných prvků je pro určitý element obecně popsána vztahem

$$\{F\} = [k] \cdot \{u\} \quad (1.1)$$

Kdy setrvačné síly jsou nulové nebo zanedbatelné.

$$\text{Kde } \{F\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$

je vektor zobecněných uzlových sil,

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (1.3)$$

je vektor zobecněných uzlových posuvů.

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m1} & \cdots & k_{mn} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

je lokální matice tuhosti obecného elementu popisující jednotlivý daný element a mění se pro každý různý element. Každá matice tuhosti musí být pozitivně definitní a její rozměr je dán počtem stupňů volnosti. Stupeň volnosti je definován jako možný nezávislý pohyb, kterým se těleso dostane z jedné polohy do druhé ať už v rovině nebo v prostoru. Další definice stupně volnosti zní jako minimální počet souřadnic, kterými jde těleso jednoznačně zakótovat polohu tělesa v rovině nebo v prostoru. Mezi jednotlivými pohyby tělesa nesmí platit žádný explicitní vztah. Lokální matice tuhosti se zakomponují do globální matice tuhosti popisující celý systém. Lokální matice prvku je obecně dána vztahem

$$[k] = \int_{(V)} [G]^T \cdot [C] \cdot [G] dV \quad (1.5)$$

$$\text{Kde } [G] = [\partial]^T \cdot [N] \quad (1.6)$$

Operátorová matice má tvar

$$[\partial] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Matice tvarových funkcí

$$[N] = [M] \cdot [A]^{-1} \quad (1.8)$$

kde  $[M]$  je matice báзовých funkcí a liší se podle typu prvku.

$$[A] = \{r\} \cdot \{\alpha\}^{-1} \quad (1.9)$$

je matice relací a její rozměr je dán počtem stupňů volnosti.

$$\text{kde } \{\alpha\} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \vdots \\ \alpha_i \\ \vdots \\ \alpha_m \end{Bmatrix} \quad (1.10)$$



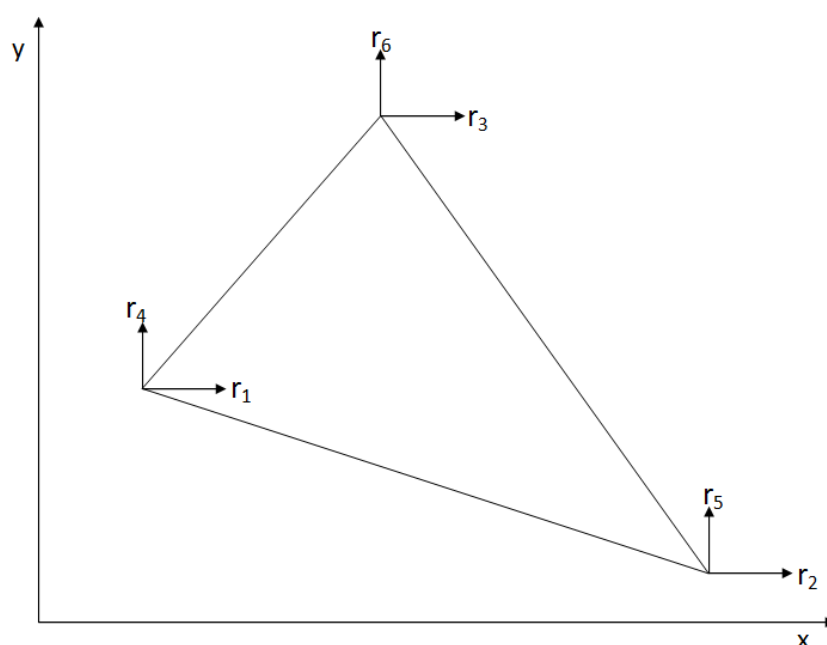
je vektor zobecněných souřadnic. Aby byly tyto souřadnice jednoznačně určeny je třeba, aby počet zobecněných souřadnic byl roven počtu zobecněných posuvů prvku, tedy roven stupňů volnosti daného prvku.

$$\{r\} = \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ \vdots \\ r_i \\ \vdots \\ r_m \end{Bmatrix} \quad (1.11)$$

je vektor zobecněných posuvů v uzlech.

### 1.1 Trojúhelníkový prvek

Jedná se o nejjednodušší rovinný prvek s šesti stupni volnosti. Lokální matice tuhosti pro tento prvek bude mít rozměr 6x6. Trojúhelníkové prvky umožňují pokrýt jakoukoli tvarově složitou rovinnou oblast.



**Obrázek 1.1 - trojúhelníkový prvek**

Polynom pro posuvy obecného bodu má tvar

$$\{u\} = [M] \cdot \{\alpha\} \quad (1.12)$$

Kde matice báзовých funkcí

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

a vektor zobecněných souřadnic

$$\{\alpha\} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix} \quad (1.14)$$

je nutno stanovit na základě posuvů v uzlech trojúhelníkového prvku. Po rozepsání polynomu z maticového tvaru bude vypadat polynom pro posuvy

$$u(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y \quad (1.15 - a)$$

$$v(x, y) = \alpha_4 + \alpha_5 \cdot x + \alpha_6 \cdot y \quad (1.15 - b)$$

$$\text{Po dalším rozepsání kdy } \{r\} = [A] \cdot \{\alpha\} \quad (1.16)$$

$$\text{kde } \{r\} = \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{Bmatrix} \quad (1.17)$$

$$\text{a matice } [A] = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_k & y_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

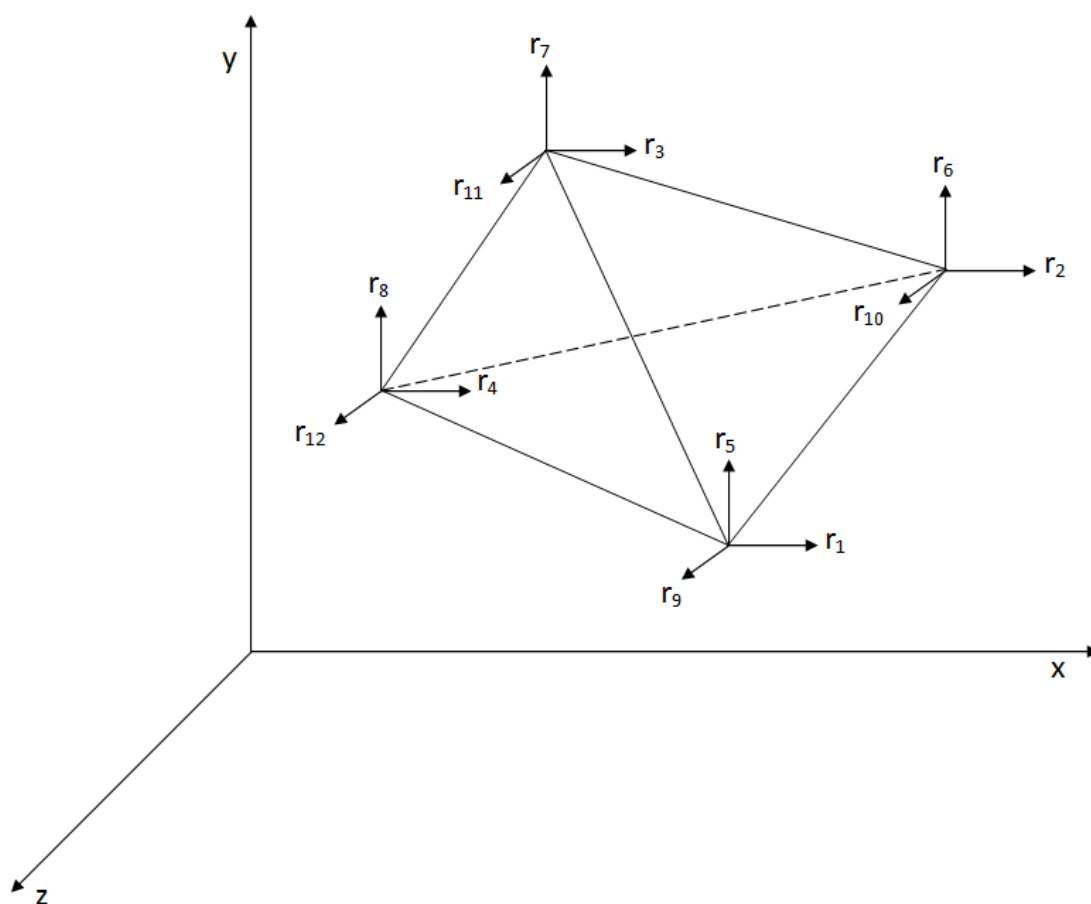
matice tuhosti

$$\begin{aligned} [k] &= h \cdot |\Delta S| \cdot \begin{bmatrix} G_i \\ G_j \\ G_k \end{bmatrix}^T \cdot [C] \cdot \begin{bmatrix} G_i & G_j & G_k \end{bmatrix} = \\ &= h \cdot |\Delta S| \cdot \begin{bmatrix} G_i \cdot [C] \cdot G_i & G_i \cdot [C] \cdot G_j & G_i \cdot [C] \cdot G_k \\ G_j \cdot [C] \cdot G_i & G_j \cdot [C] \cdot G_j & G_j \cdot [C] \cdot G_k \\ G_k \cdot [C] \cdot G_i & G_k \cdot [C] \cdot G_j & G_k \cdot [C] \cdot G_k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Nutno podotknout, že prvek matice tuhosti prvku je submatice rozměru 2x2.

## 1.2 Čtyřstěnový prvek

Je rozšířením trojúhelníkového prvku pro rovinný případ, čtyřstěn je tvořen čtyřmi rovinnými trojúhelníkovými stěnami. V dnešní době se jen zřídka vyskytují samostatně, jsou většinou doplněny dalšími rovinnými prvky. Tento prvek má 12 stupňů volnosti, výsledná lokální matice bude mít tedy rozměr 12x12.



Obrázek 1.2 - čtyřstěnový prvek

Polynom pro posuvy obecného bodu má tvar

$$\{u\} = [M] \cdot \{\alpha\} \quad (1.20)$$

Kde matice báзовých funkcí

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

a vektor zobecněných souřadnic

$$\{\alpha\} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \vdots \\ \alpha_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.22)$$

je nutno stanovit na základě posuvů v uzlech čtyřstěnového prvku. Po rozepsání polynomu z maticového tvaru bude vypadat polynom pro posuvy

$$u(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot z \quad (1.23 - a)$$

$$v(x, y) = \alpha_5 + \alpha_6 \cdot x + \alpha_7 \cdot y + \alpha_8 \cdot z \quad (1.23 - b)$$

$$w(x, y) = \alpha_9 + \alpha_{10} \cdot x + \alpha_{11} \cdot y + \alpha_{12} \cdot z \quad (1.23 - c)$$

$$\text{Když to také dále rozepíšeme do tvaru } \{r\} = [A] \cdot \{\alpha\} \quad (1.24)$$

$$\text{kde } \{r\} = \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ \vdots \\ r_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.25)$$

$$\text{a matice } [A] = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_j & y_j & z_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_k & y_k & z_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_l & y_l & z_l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i & z_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j & z_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k & z_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_l & y_l & z_l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j & z_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k & z_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_l & y_l & z_l \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

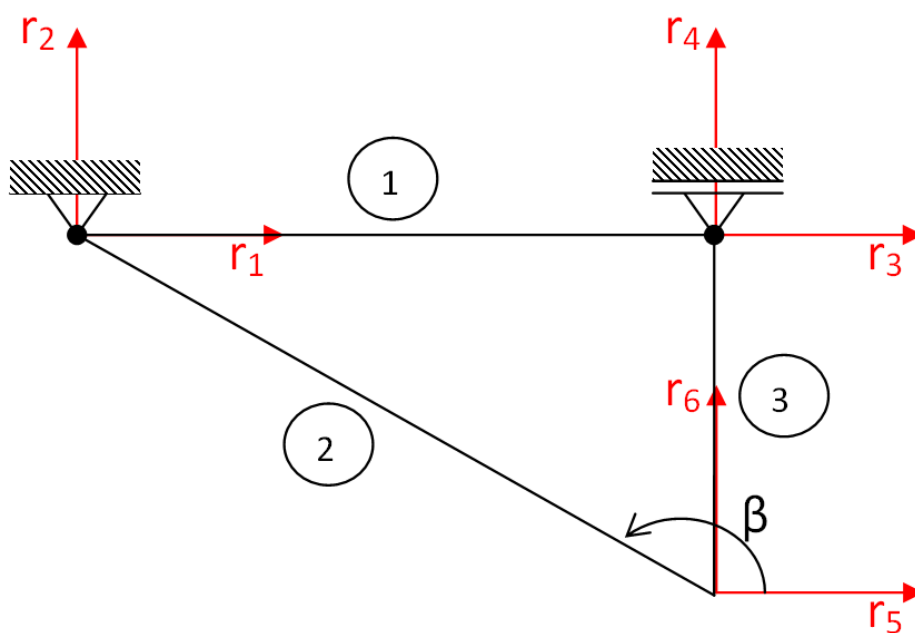
matice tuhosti

$$[k] = \int_{(V)} \begin{bmatrix} G_i \\ G_j \\ G_k \\ G_l \end{bmatrix}^T \cdot [C] \cdot [G_i \ G_j \ G_k \ G_l] dV =$$

$$\begin{bmatrix} G_i \cdot [C] \cdot G_i & G_i \cdot [C] \cdot G_j & G_i \cdot [C] \cdot G_k & G_i \cdot [C] \cdot G_l \\ G_j \cdot [C] \cdot G_i & G_j \cdot [C] \cdot G_j & G_j \cdot [C] \cdot G_k & G_j \cdot [C] \cdot G_l \\ G_k \cdot [C] \cdot G_i & G_k \cdot [C] \cdot G_j & G_k \cdot [C] \cdot G_k & G_k \cdot [C] \cdot G_l \\ G_l \cdot [C] \cdot G_i & G_l \cdot [C] \cdot G_j & G_l \cdot [C] \cdot G_k & G_l \cdot [C] \cdot G_l \end{bmatrix} dV \quad (1.27)$$

Nutno podotknout, že prvek matice tuhosti prvku je submatice rozměru 3x3.

Lokalizační princip bude popsán na jednoduchém příkladě prutové soustavy (viz obrázek 1.3). Globální matici prutové soustavy sestavíme za předpokladu, že platí princip superpozice lokálních matic jednotlivých prutů.



**Obrázek 1.3 - prutová soustava**

Lokální matice tuhosti pro první element

$$[k^{1el}] = \frac{E \cdot S}{l} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \quad (1.28)$$

Lokální matice tuhosti pro druhý element

$$[k^{2el}] = \frac{E \cdot S}{l} \cdot \begin{bmatrix} \overset{5}{\cos^2 \beta} & \overset{6}{\cos \beta \cdot \sin \beta} & \overset{1}{-\cos^2 \beta} & \overset{2}{-\cos \beta \cdot \sin \beta} \\ \cos \beta \cdot \sin \beta & \sin^2 \beta & -\cos \beta \cdot \sin \beta & -\sin^2 \beta \\ -\cos^2 \beta & -\cos \beta \cdot \sin \beta & \cos^2 \beta & \cos \beta \cdot \sin \beta \\ -\cos \beta \cdot \sin \beta & -\sin^2 \beta & \cos \beta \cdot \sin \beta & \sin^2 \beta \end{bmatrix} \begin{matrix} 5 \\ 6 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} \quad (1.29)$$

Lokální matice tuhosti pro třetí element

$$[k^{3el}] = \frac{E \cdot S}{l} \cdot \begin{bmatrix} \overset{5}{0} & \overset{6}{0} & \overset{3}{0} & \overset{4}{0} \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} 5 \\ 6 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \quad (1.30)$$

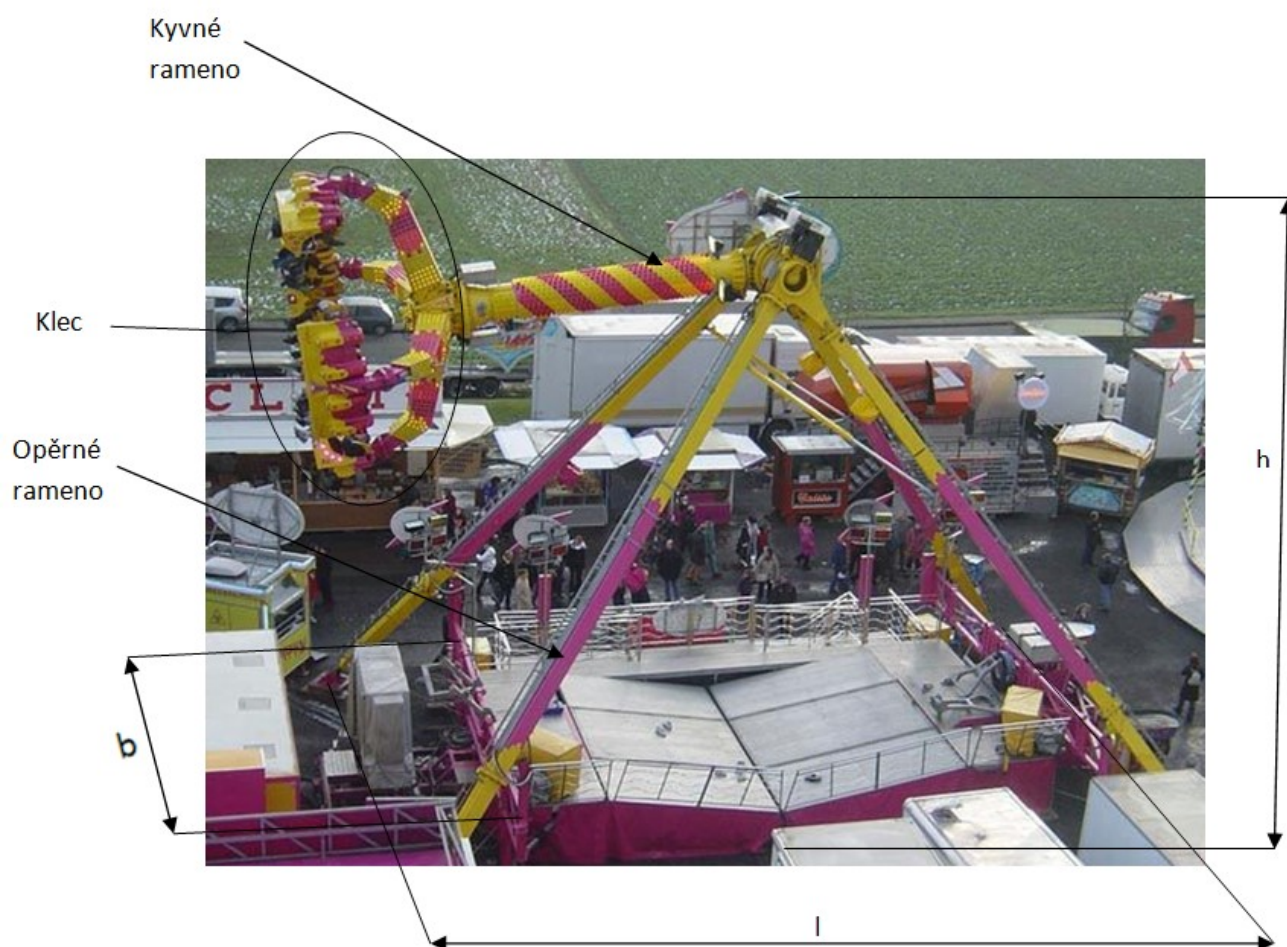
Globální matice se nyní sestaví tak, že jednotlivé lokální matice tuhosti jednotlivých prutů se sečtou pro společný uzel a směr, tedy na společné adrese, která je určena číslem řádku a sloupce, je proto nutné průběžné číslování v globálním systému. Prutová soustava má šest stupňů volnosti, výsledná globální matice tuhosti bude mít tedy rozměr 6x6.

$$[K] = \frac{E \cdot S}{l} \cdot \begin{bmatrix} \overset{1}{1 + \cos^2 \beta} & \overset{2}{\cos \beta \cdot \sin \beta} & \overset{3}{-1} & \overset{4}{0} & \overset{5}{-\cos^2 \beta} & \overset{6}{-\cos \beta \cdot \sin \beta} \\ \cos \beta \cdot \sin \beta & \sin^2 \beta & 0 & 0 & -\cos \beta \cdot \sin \beta & -\sin^2 \beta \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\cos^2 \beta & -\cos \beta \cdot \sin \beta & 0 & 0 & \cos^2 \beta & \cos \beta \cdot \sin \beta \\ -\cos \beta \cdot \sin \beta & -\sin^2 \beta & 0 & -1 & \cos \beta \cdot \sin \beta & 1 + \sin^2 \beta \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \quad (1.31)$$

Při řešení teoretické rešerše statické úlohy bylo čerpáno z [5] a [7].

## 2. Popis zařízení

Atrakce STREET FIGHTER je zábavní pouťové zařízení, které lze instalovat opakovaně bez poškození, dočasně nebo trvale na pouťových prostranstvích, v zábavních parcích či jiných lokalitách. Smontované zařízení je znázorněno na obrázku 2.1, kdy rozměry jsou uvedeny v tabulce 2.1



Obrázek 2.1 – Celkové dispozice.

Rozměry smontované atrakce			
Název	Jednotka	Označení	Hodnota
Délka	[mm]	$l$	13 700
Šířka	[mm]	$b$	10 200
Výška	[mm]	$h$	11 500

Tabulka 4.1 - Rozměry smontované atrakce.

Zábavní zařízení je určeno k rotaci osob v sedačkách jednotlivých gondol, tyto gondole jsou čtyři, které nabízejí místo pro čtyři osoby, celkem tedy pro šestnáct osob. Tyto gondole mají pracovní název klec, ta je umístěna v dolní části kyvného ramene. Kyvné rameno je délky

$$l = 7\,000\text{ mm} \quad (2.1)$$

s maximální výchylkou měřenou od svislice až do úhlu

$$\alpha_k = 120^\circ. \quad (2.2)$$

Kyvné rameno je kloubově uloženo na čtyřech opěrných ramenech, tyto jsou zakotveny do rámu příhradové konstrukce a tato konstrukce je zapřena do země (viz obrázek 2.1). Maximální výška, do které se klec umístěná na konci ramene dostane:

$$v = 16\,500\text{ mm}. \quad (2.3)$$

perioda otáčení klece je

$$T_R = 4\text{ s}. \quad (2.4)$$

Úhlová rychlost otočení klece

$$\omega_R = \frac{2 \cdot \pi}{T_R} \cdot 60 \quad (2.5 - a)$$

$$\omega_R = \frac{2 \cdot \pi}{4} \cdot 60 \quad (2.5 - b)$$

$$\omega_R = 94,3\text{ rad} \cdot \text{min}^{-1} \quad (2.5 - c)$$

Maximální rychlost koncového bodu kyvného ramena viz [4] je

$$v = 10,99\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (2.6 - a)$$

Maximální úhlová rychlost kyvného ramena

$$\omega_R = \frac{v}{l} \cdot 60 \quad (2.7 - a)$$

$$\omega_R = \frac{10,99}{7} \cdot 60 \quad (2.7 - b)$$

$$\omega_R = 94,2\text{ rad} \cdot \text{min}^{-1} \quad (2.7 - c)$$

Atrakce je poháněna třemi elektromotory s převodovkou, z toho dva hlavní elektromotory kývají kyvným ramenem a vedlejší elektromotor zajišťuje rotaci klece - ta je zobrazena na obrázku 2.3.





Obrázek 2.3 - Klec s gondolami.

Vzhledem k tomu, že tato atrakce je mobilní, musí se demontovat do přepravních rozměrů, tyto rozměry jsou uvedeny v tabulce 2.2. Demontovaná atrakce je zobrazena na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4 - Demontované zařízení.

Převážní rozměry			
Název	Jednotka	Označení	Hodnota
Délka	[mm]	L	13 700
Šířka	[mm]	B	2 550
Výška	[mm]	H	4 000

Tabulka 2.2 - Základní převážní rozměry

## 2.1 Parametry v různých polohách

Zařízení je zobrazeno ve třech různých polohách (obrázek 2.5, obrázek 2.6, obrázek 2.7), pro názornost jsou vždy jednotlivé polohy doplněny tabulkou (tabulka 2.5, 2.6 a 2.7), ve kterých jsou uvedeny technické parametry rychlosti a výchylky.



Obrázek 2.5 – Kyvné rameno v horní úvrti.

Parametry v horní úvrti			
Název	Jednotka	Označení	Hodnota
Úhlová frekvence kyvného ramene	[min <sup>-1</sup> ]	$\omega_K$	0
Úhlová frekvence klece	[min <sup>-1</sup> ]	$\omega_R$	94,3
Výchylka kyvného ramene	[°]	$\alpha_K$	120

Tabulka 2.5 - Parametry v horní úvrti.



Obrázek 2.6 - Kyvné rameno v obecné poloze.

Parametry v obecné poloze			
Název	Jednotka	Označení	Hodnota
Úhlová frekvence kyvného ramene	$[\text{min}^{-1}]$	$\omega_K$	$0 < \omega_K < 47,1$
Úhlová frekvence klece	$[\text{min}^{-1}]$	$\omega_R$	94,3
Výchylka kyvného ramene	$[\text{°}]$	$\alpha_K$	$0^\circ < \alpha_K < 120^\circ$

Tabulka 2.6 – Parametry v obecné poloze.



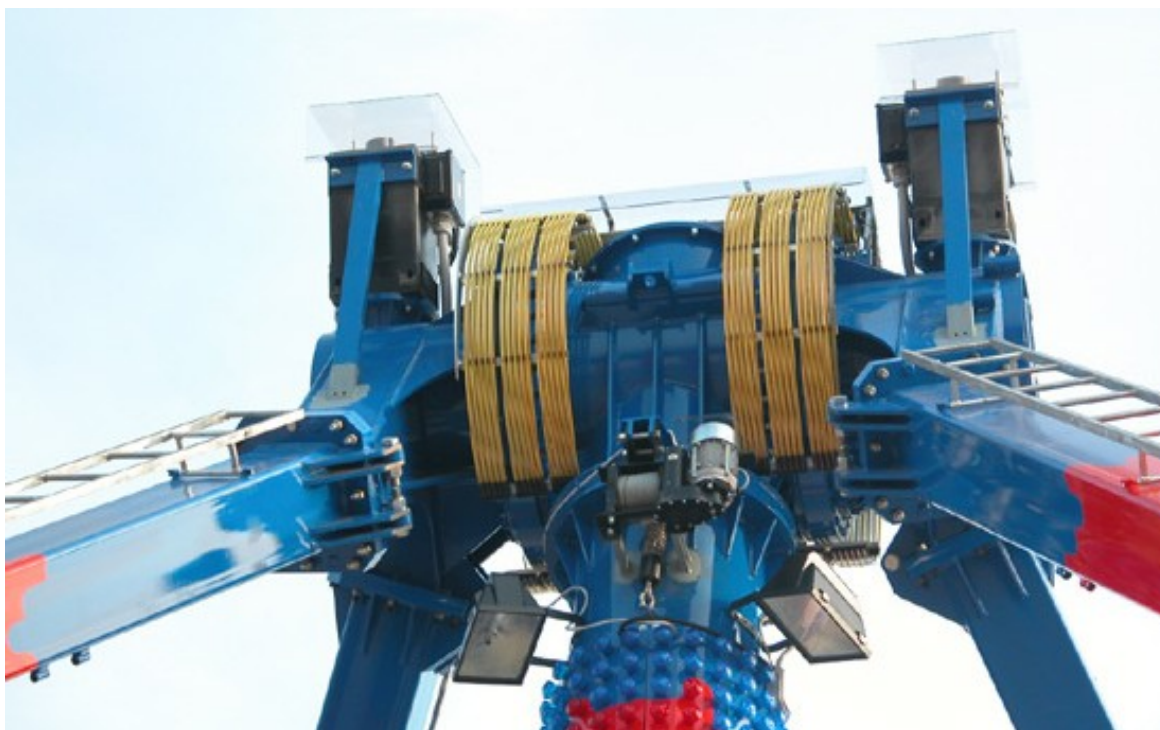


Obrázek 2.7 – Kyvné rameno v dolní úvrati.

Parametry v dolní úvrati			
Název	Jednotka	Označení	Hodnota
Úhlová frekvence kyvného ramene	$[\text{min}^{-1}]$	$\omega_K$	47,1
Úhlová frekvence klece	$[\text{min}^{-1}]$	$\omega_R$	94,3
Výchylka kyvného ramene	$[\text{°}]$	$\alpha_K$	0

Tabulka 2.7 - Parametry v dolní úvrati.

Popis atrakce je doplněn detailem uložení kyvného ramene (obrázek 2.8), na kterém je mimo jiné zobrazeno pomocné zvedací zařízení, sada kroužků a kartáčů pro přenos elektrické energie do pohyblivého kyvného ramene.



Obrázek 2.8 - Detail uložení kyvného ramene.

### 3. Technické požadavky na klec zábavního zařízení

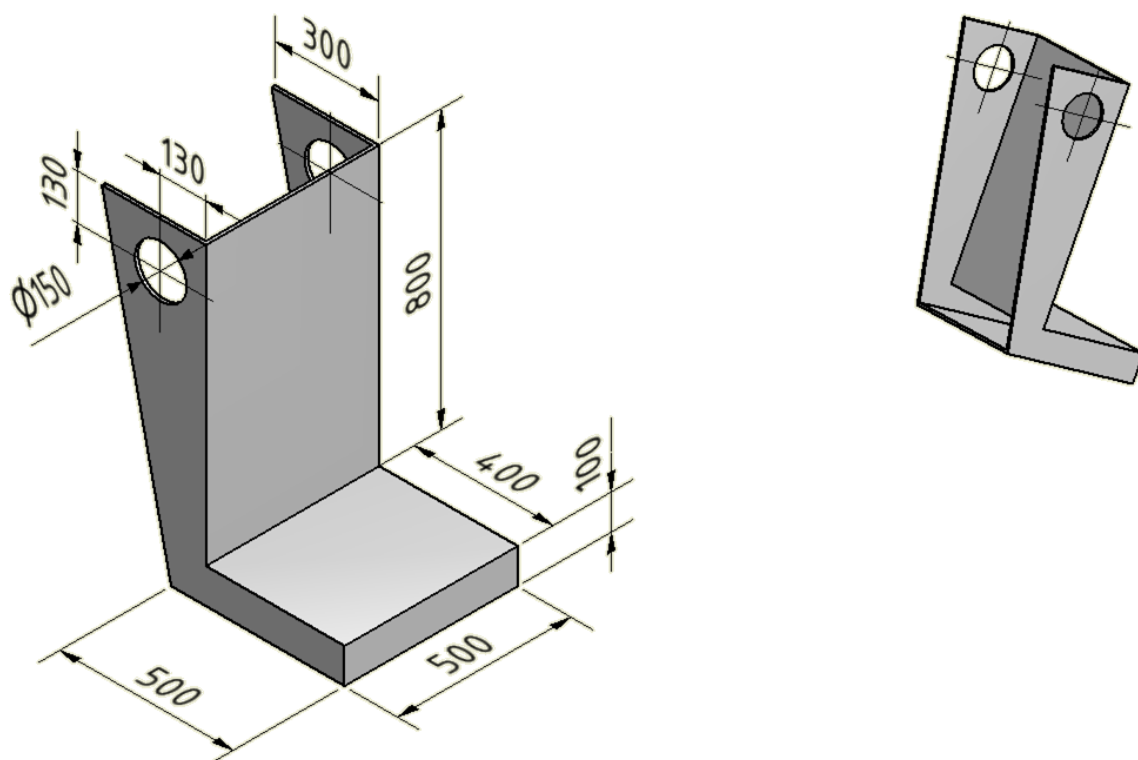
Technické požadavky na klec jsou stanoveny hned třemi skupinami lidí. Společný požadavek všech třech skupin je neoddiskutovatelně bezpečnost. Hledisko bezpečnosti je zásadním požadavkem na klec zábavního zařízení a je mu proto nutno věnovat dostatečnou pozornost. První skupinou lidí, které mají určité požadavky a nároky jsou bezesporu samotní zákazníci, kteří mimo již zmíněné bezpečnosti vyžadují pohodlné a ergonomické usazení v sedačkách gondol. Tyto sedačky musí podpírat všechny části těla, které by mohly být zraněny. Toto bude zajištěno dodatečně namontovanou ergonomicky polstrovanou sedačkou. Další skupinou jsou provozovatelé těchto atrakcí, kteří vyžadují co možná nejlehčí konstrukci klece, která by umožňovala snadnou častou montáž a demontáž jednotlivých dílů, kterými rozumíme zejména gondoly, tedy nosná ramena se sedačkami, v co nejkratším možném čase. Tyto požadavky musí brát na vědomí výrobce, respektive konstruktéři zábavního zařízení a skloubit je do sebe podle svých schopností a možností. Jedním z mnoha důležitých faktorů je tedy velikost dosedacích ploch, na které se namontují samotné sedačky. Prostor pro cestující musí být dimenzován tak, aby bezpečně pojal všechny zákazníky za všech provozních situací, ale také při předpokládaných nouzových situacích. Samotná klec tedy musí zajistit, aby zákazník nemohl být vymrštěn, nesmí dojít k fyzickému poranění osob zádržným zařízením a zraněním během nástupu a výstupu. Dalším omezením ovlivňující tvar a velikost klece je prostor, do kterého se jednotlivé demontované díly musí uložit, což s sebou nese další úskalí při návrhu klece jako celku. Jedním z mnoha možných řešení, kterým se tato práce bude zabývat, je upevnění nosných ramen pomocí dvou čepů. Spodní čep je namontován stabilně a zároveň působí jako kloubové uložení, kolem kterého se nosné rameno během montáže a demontáže klece otáčí. Toto rameno je na druhém konci opatřeno přírubou. Samotná gondola je rovněž opatřena přírubou, tyto zajišťují správné ustavení těchto dvou částí, ale také především pevné spojení pomocí přesných lícovaných šroubů situovaných po obvodě přírub. Maximální uvažovaná hmotnost jedné osoby činí dle normy (ČSN EN 13 814) 100 kg, předpokládaná hmotnost dodatečně namontované sedačky, zádržného systému a reklamního osvětlení je 20 kg.

Při stanovení požadavků bylo čerpáno z [3].

#### 4. Schéma navržené klece

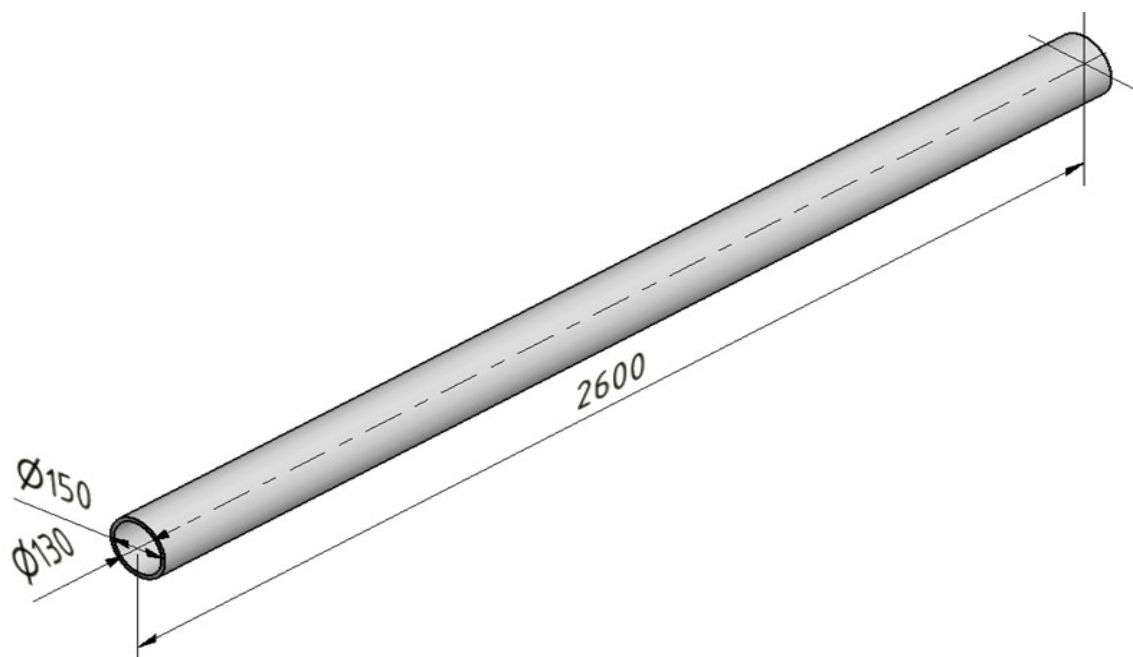
Klec se skládá ze čtyř gondol. Každá z gondol je sestavená z nosného ramene, z trubky na které jsou namontovány sedačky.

Samotná sedačka je tvořena jako svařenec z tlustých plechů (dle ČSN 42 5310) o jmenovité tloušťce 5 mm (viz obrázek 4.1)



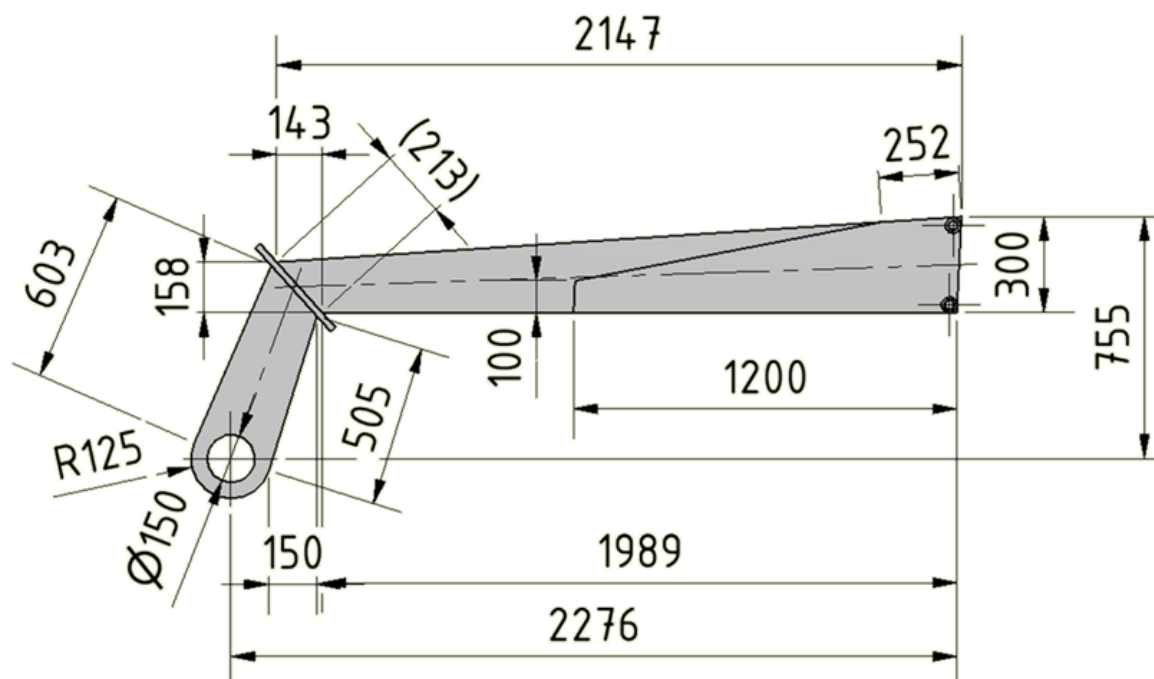
Obrázek 4.1 – sedačka

Tyto sedačky nese ocelová bezešvá trubka (dle ČSN 42 5715), jejíž rozměry jsou znázorněny na obrázku 4.2.



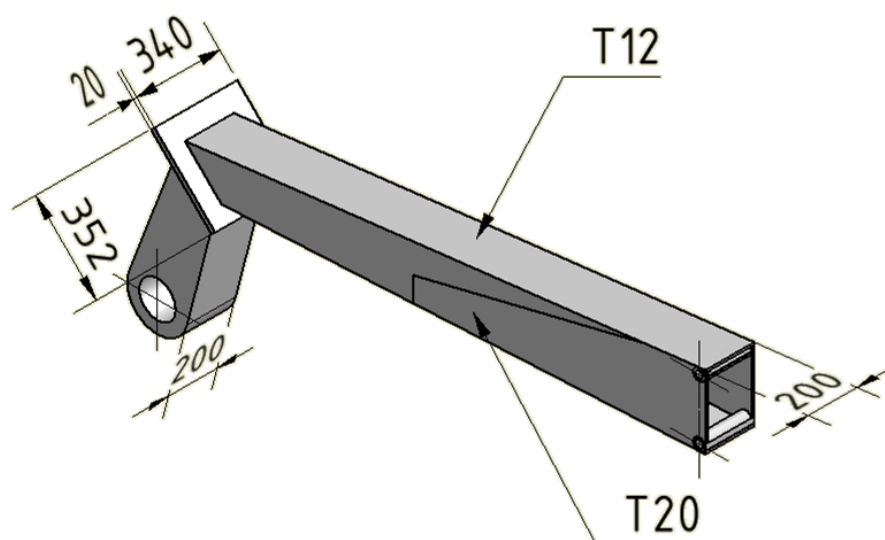
**Obrázek 4.2 - ocelová trubka**

Výše zmíněná trubka je vsazena do nosného ramene (viz obrázek 4.3, obrázek 4.4, obrázek 4.5). Nosné rameno je tvořeno z několika součástí – svařenců z tlustých plechů (dle ČSN 42 5310) o tloušťkách 10 mm (mimo vyznačené plochy viz obrázek 4.4 a obrázek 4.5). Vyznačené příruby jsou pro zjednodušení modelovány jako jeden celek, tedy pouze jako jedna příruba, avšak s tloušťkou obou přírub.

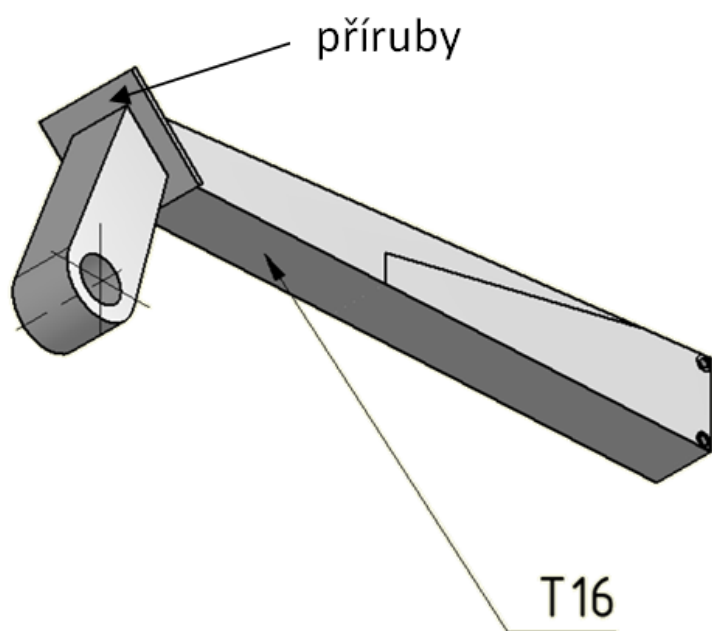


**Obrázek 4.3 - nosné rameno**



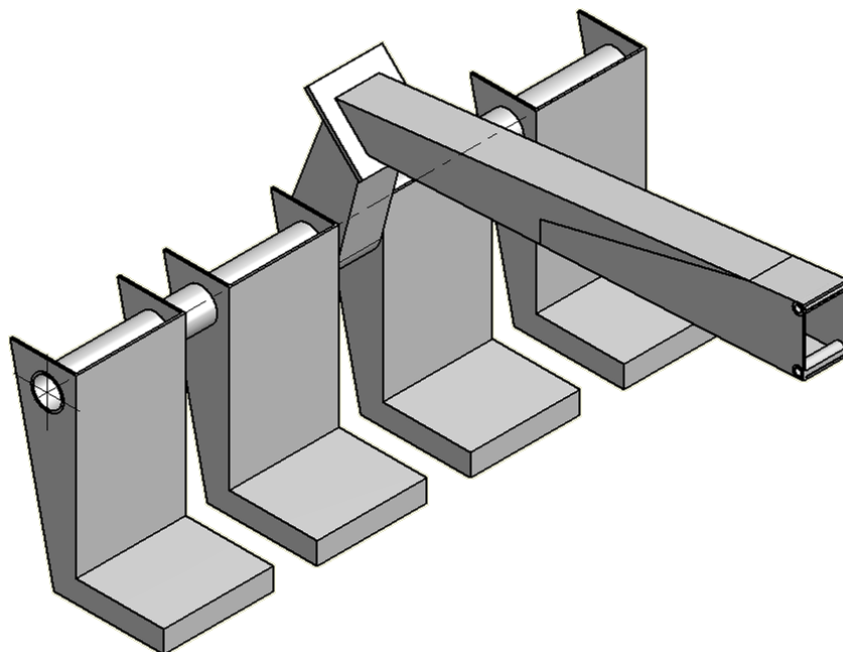


Obrázek 4.4- nosné rameno 2

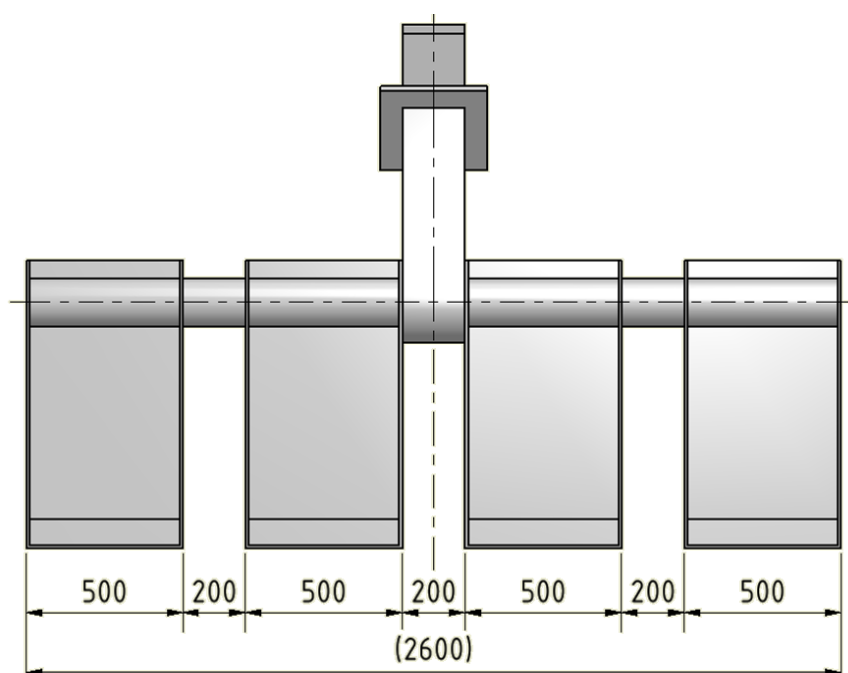


Obrázek 4.5 - nosné rameno 3

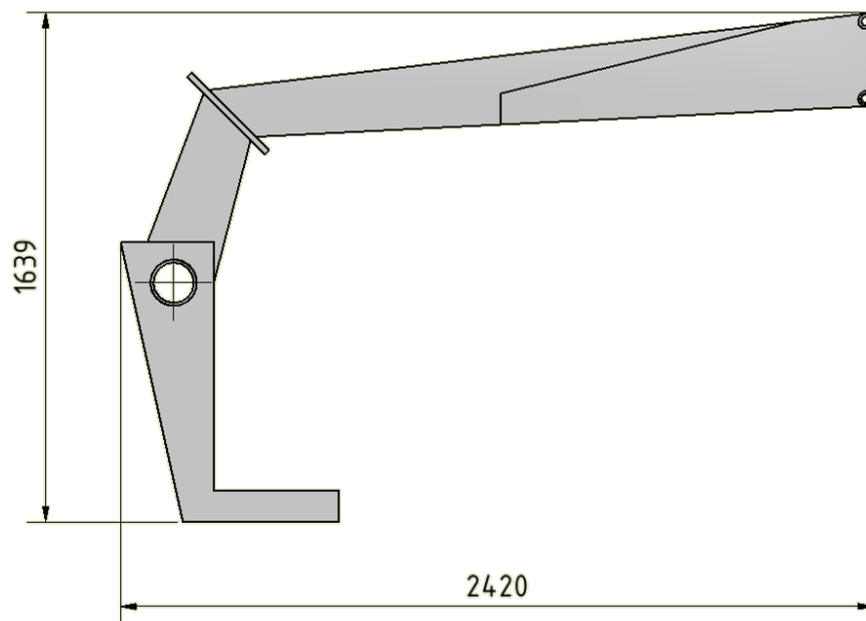
Gondola je sestavena z nosného ramene, ocelové trubky a ze čtyř sedaček nasunutých na ocelové trubce (viz obrázek 4.6 a obrázek 4.9). Rozměry jsou patrné z obrázků 4.7 a obrázku 4.8.



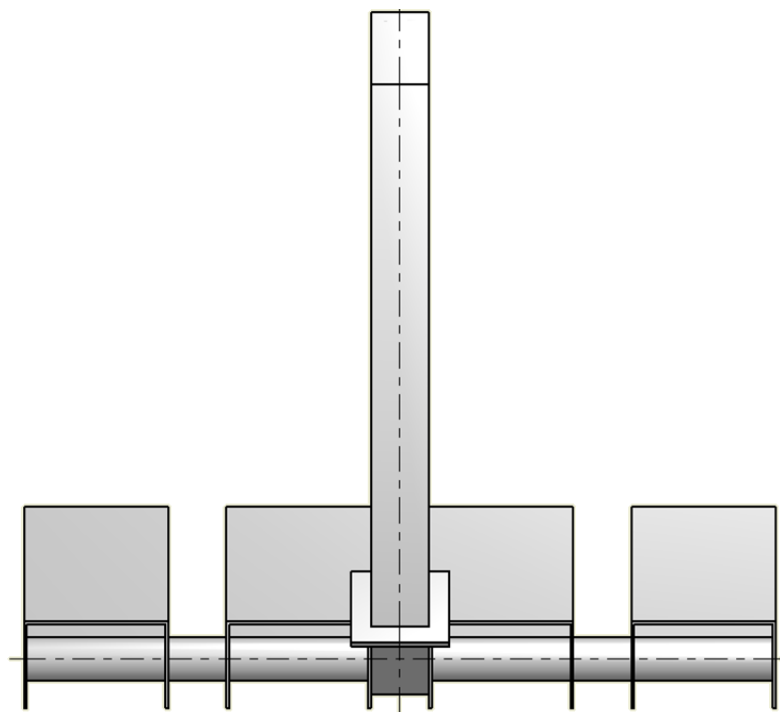
Obrázek 4.6 - gondola (prostorový model)



Obrázek 4.7 - gondola (nárys)

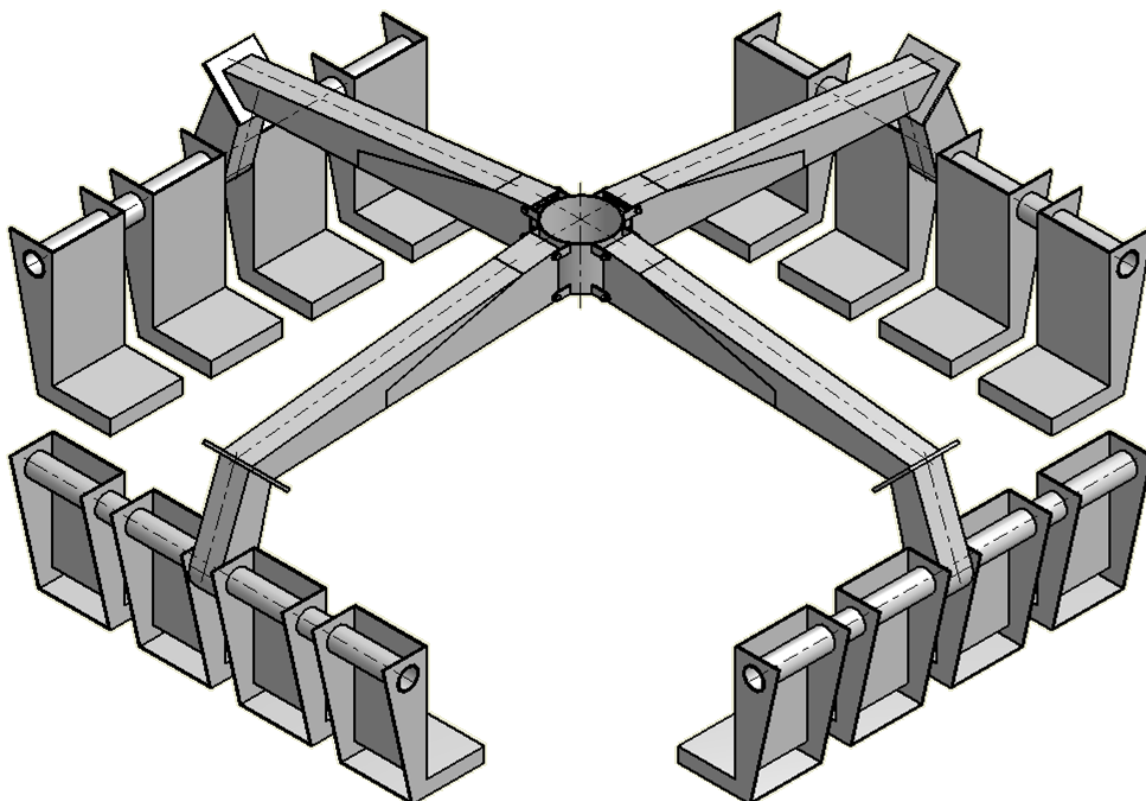


Obrázek 4.8 gondola (bokorys)

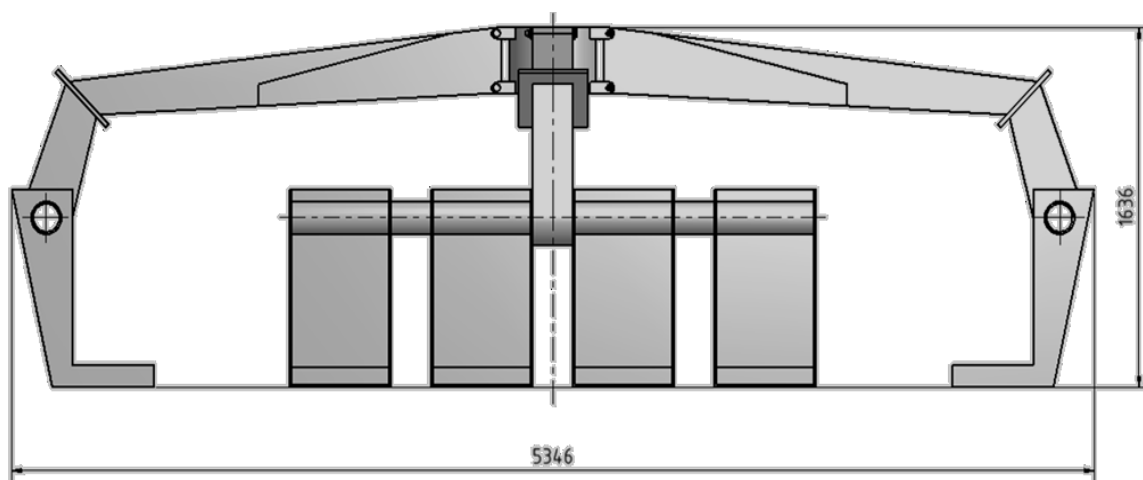


Obrázek 4.9 - gondola (půdorys)

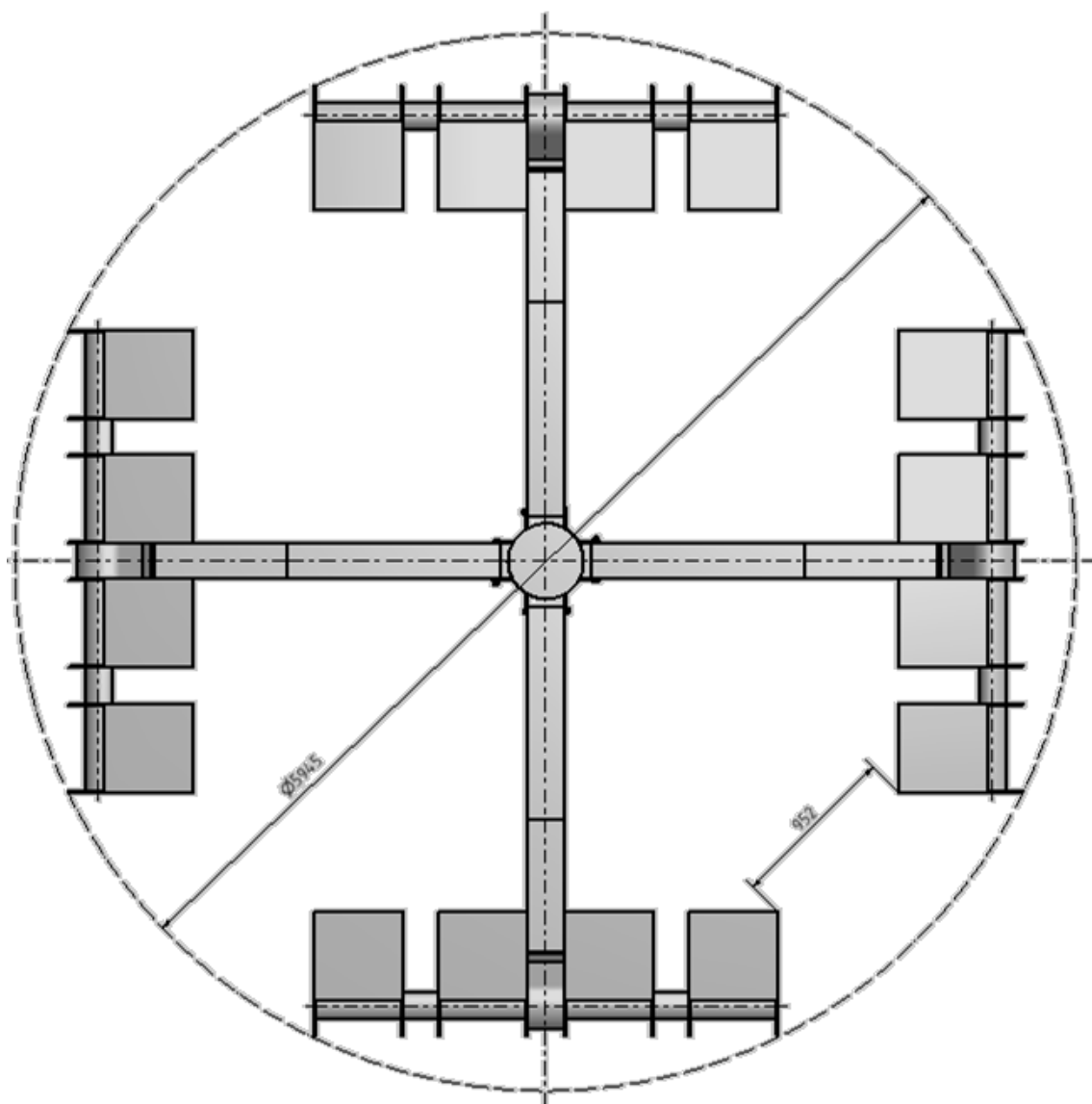
Klec tvoří poslední sestavný celek práce a je tvořena čtyřmi gondolami (viz obrázek 4.10). Při návrhu celkového řešení klece bylo bráno v úvahu také to, aby byl zajištěn dostatečný průchod mezi sedačkami umístěných na sousedních gondolách (viz obrázek 4.12). Vnější rozměry klece jsou znázorněny na obrázku 4.11.



Obrázek 4.10 - klec (prostorový model)



Obrázek 4.11 - klec (nárys)



Obrázek 4.12 - klec (přídorys)

Všechny výše vyobrazené součásti konstrukce jsou uvažovány jako ocelové a jsou zhotoveny z materiálu 11 373. Uchycení jednotlivých gondol ke kyvnému rameni je zhotoveno z materiálu 11 523, čepy jsou vyrobeny z materiálu 11 600. Materiálové vlastnosti jsou zapsány v tabulkách 4.1, 4.2 a 4.3.

S235JRG1			
Název	Jednotka	Označení	Hodnota
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	E	$2,1 \cdot 10^5$
Poissonova konstanta	[-]	$\mu$	0,3
Mez únavy v ohybu	[MPa]	$\sigma_{oC}$	130

Tabulka 4.1 - materiálové vlastnosti oceli S235JRG1

<b>E295</b>			
<b>Název</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	E	$2,1 \cdot 10^5$
Poissonova konstanta	[-]	$\mu$	0,3
Mez únavy v ohybu	[MPa]	$\sigma_{oC}$	175

Tabulka 4.2 - materiálové vlastnosti oceli E295

<b>E335</b>			
<b>Název</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	E	$2,1 \cdot 10^5$
Poissonova konstanta	[-]	$\mu$	0,3
Mez kluzu	[MPa]	$R_e$	295

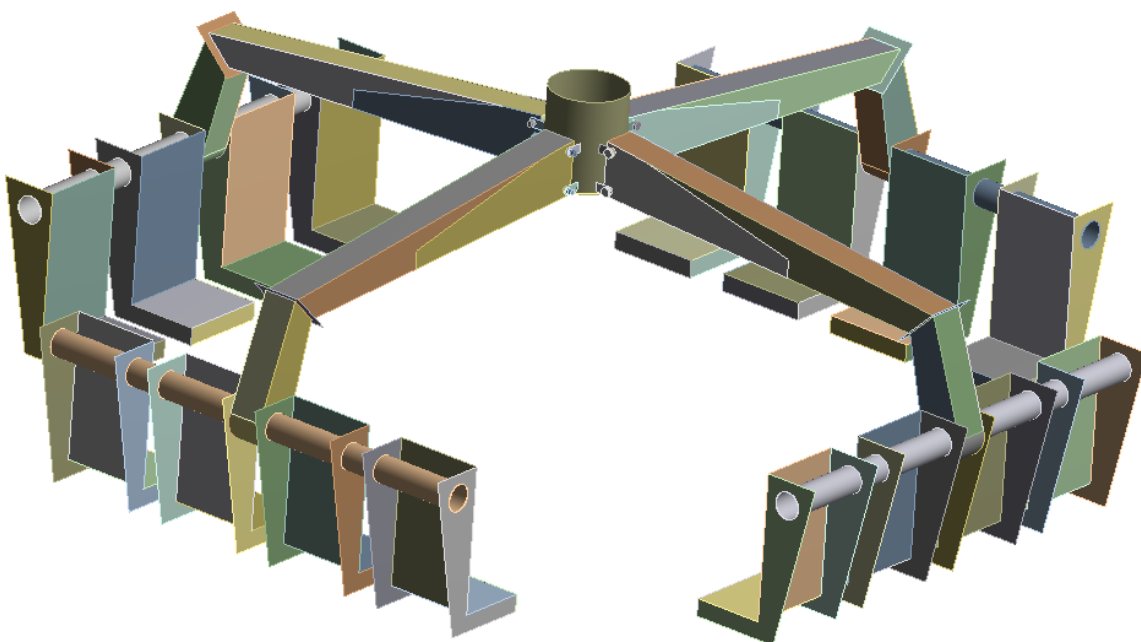
Tabulka 4.3 - materiálové vlastnosti oceli E335

## 5. Pevnostní a tuhostní kontrola pomocí metody konečných prvků

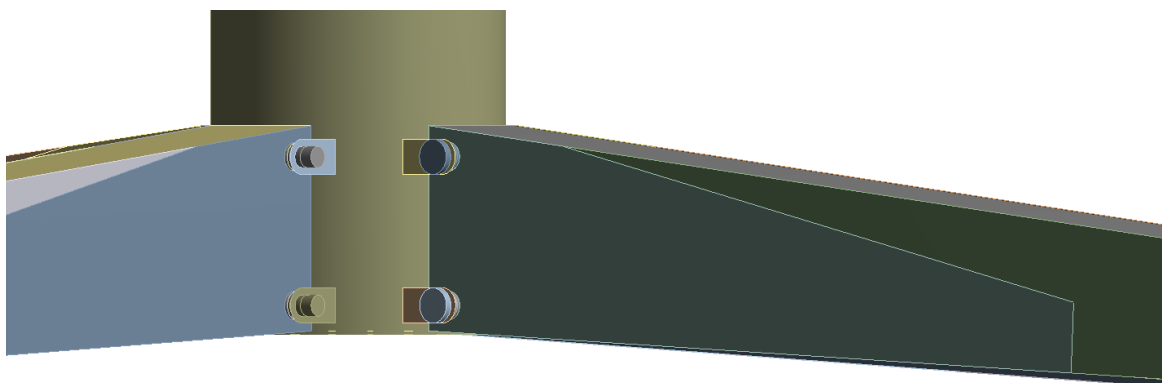
Úloha byla řešena jako statická. Při tvorbě geometrického modelu byly přijaty určité předpoklady, aby výpočetní čas byl přijatelný. Vzhledem k typu konstrukce byl celý model modelován pomocí neutrálních ploch. Analýza bude provedena v programovém prostředí ANSYS Workbench 13.0.

### 5.1 Geometrický model

Geometrický model byl tvořen skořepinovými prvky (viz. Obrázek 5.1). Detail uchycení gondol ke kyvnému rameni je znázorněn na obrázku 5.2. Detail modelu uchycení sedaček k trubce je znázorněn na obrázku 5.3.

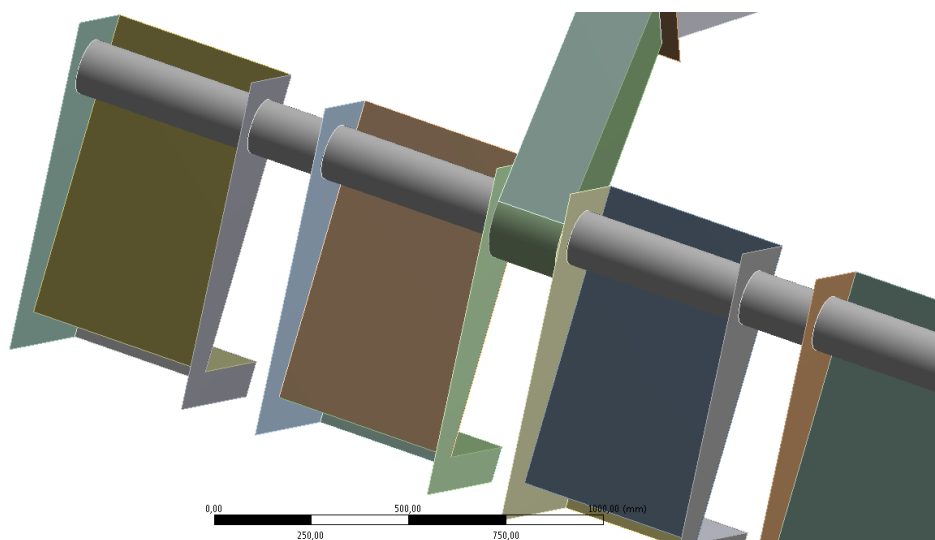


Obrázek 5.1 - zjednodušený model



Obrázek 5.2 – Detail modelu uchycení gondol ke kyvnému rameni

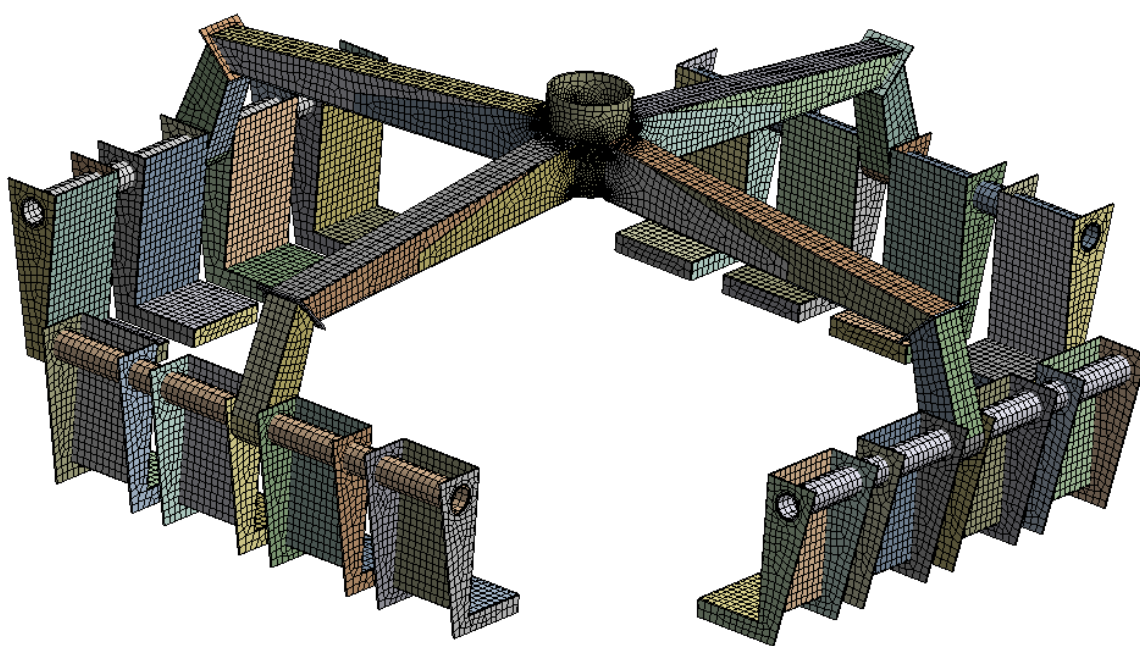
Point Mass 16  
23.5.2011 14:48



Obrázek 5.3 – detail uchycení sedaček k trubce a nosnému rameni

## 5.2 Diskretizace modelu

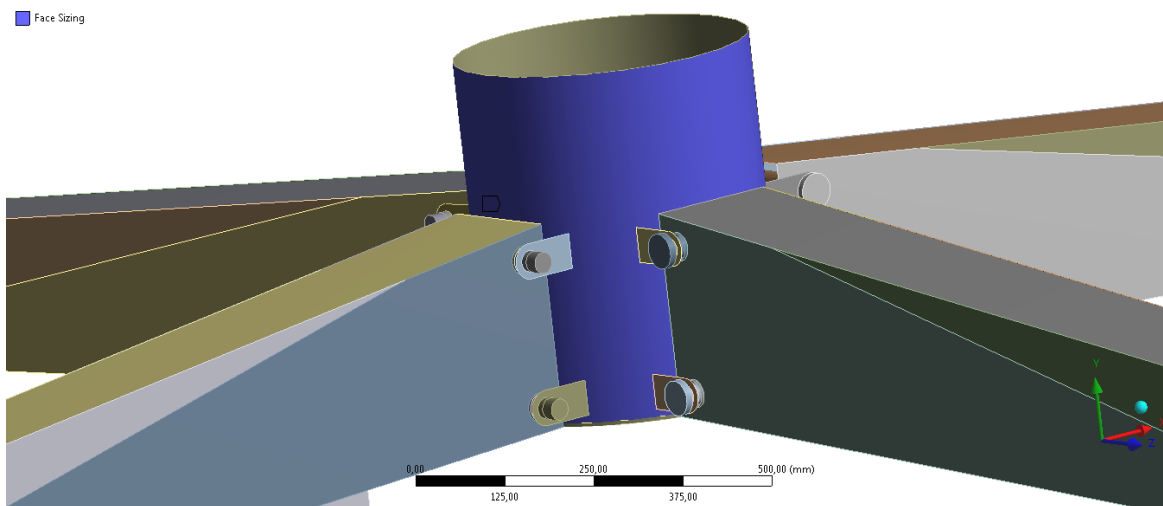
Pro řešení bylo zapotřebí model diskretizovat (viz obrázek 5.4). Počet stupňů volnosti byl 848 748.



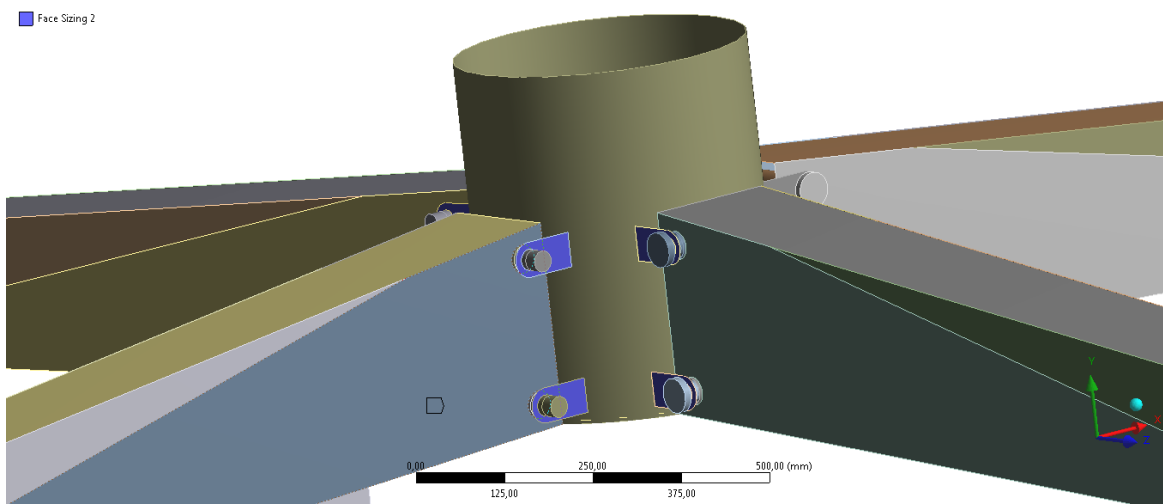
Obrázek 5.4 - diskretizovaná konstrukce

Nastavení zjemnění sítě na modře označených plochách je znázorněno na obrázku 5.5 a obrázku 5.6. Náhled takto zjemněné sítě je na obrázku 5.7

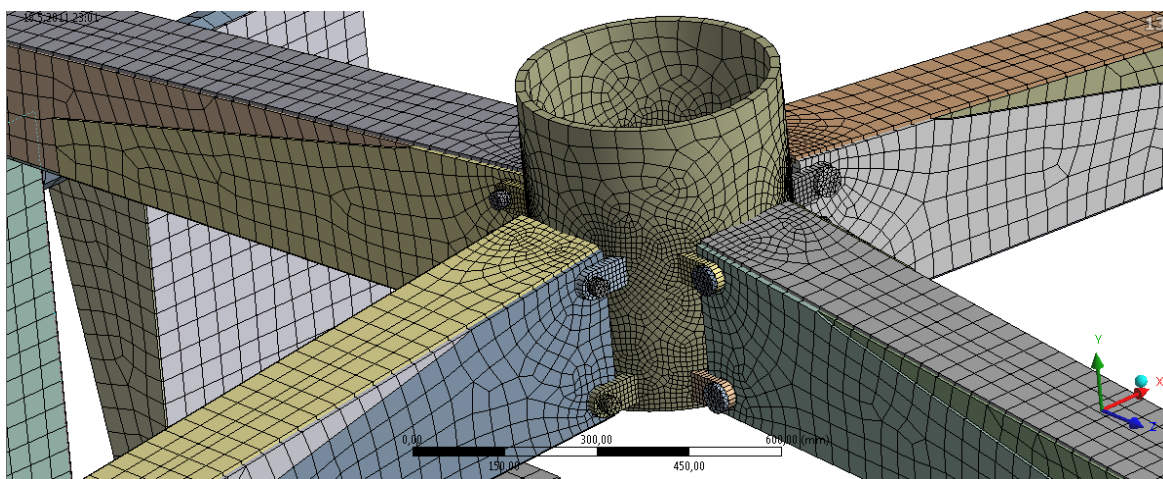




Obrázek 5.5 – nastavení zjemnění sítě na kyvném rameni



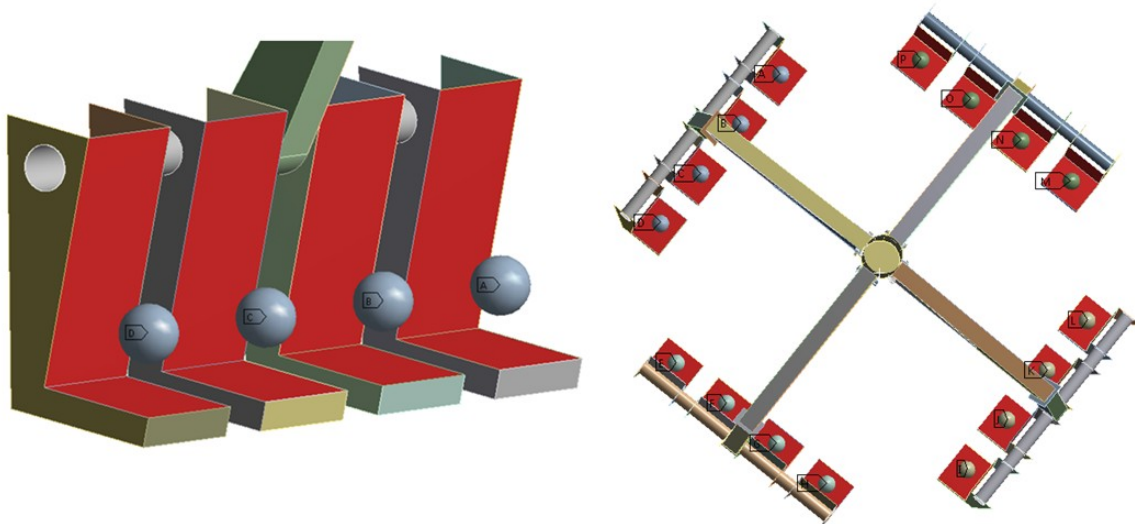
Obrázek 5.6 - nastavení zjemnění sítě úchyty



Obrázek 5.7- detail diskretizace

### 5.3 Zatížení

Zadání zatížení bylo provedeno pomocí hmotných bodů přiřazeným k červeně vyznačeným plochám (viz obrázek 5.8). Hmotnost bodu je 120 kg.



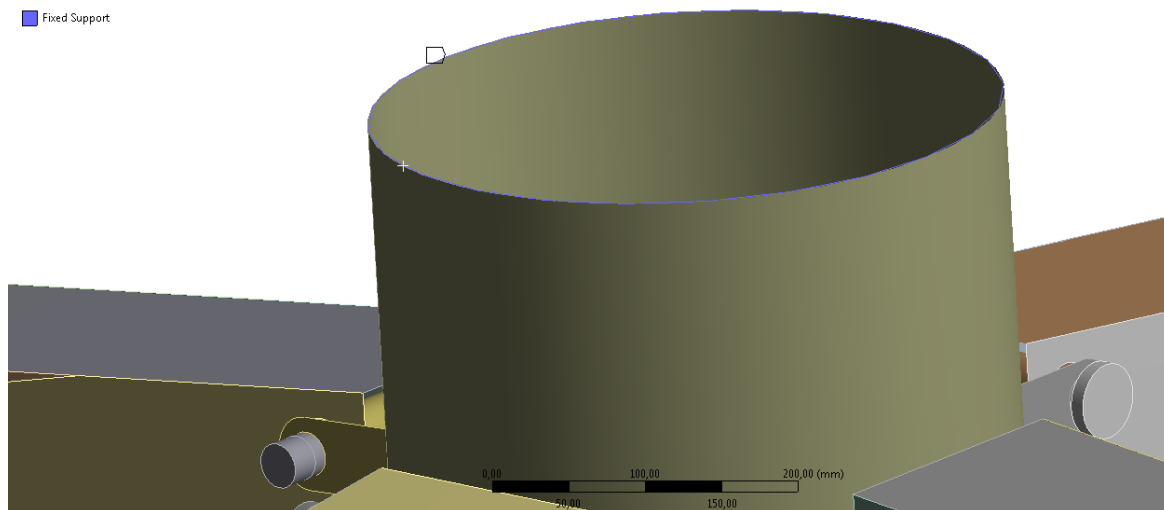
Obrázek 5.8- zadání zatížení

Během výpočtu byla také uvažována vlastní tíha klece, rotace kolem vlastní osy klece a také rotace kolem „roviny kyvu“. Úhlová rychlost otáčení klece byla  $1,571 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ . Maximální úhlová rychlost kyvu byla  $1,57 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  (při výchylce  $0^\circ$ ) a minimální úhlová rychlost  $0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  (při výchylce  $120^\circ$ ).

### 5.4 Okrajové podmínky

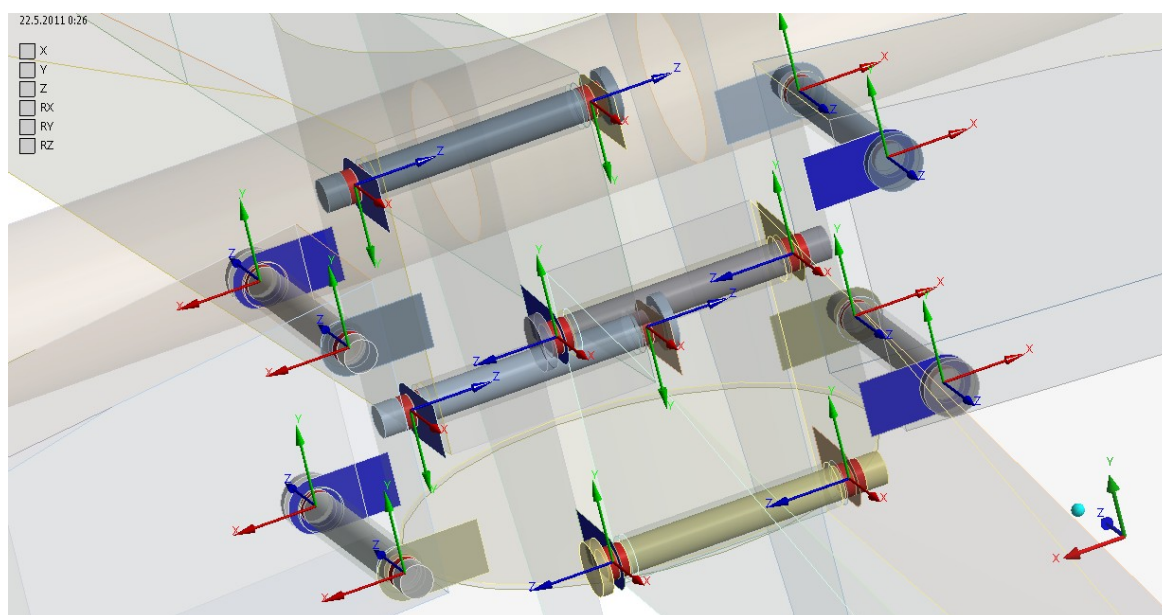
K zabránění všech posuvů a rotací byl model vetknut na modře vyznačenou křivku (viz obrázek 5.9).

A: Copy of vychylka 0 deg  
Fixed Support  
Time: 1, s  
18.5.2011 23:27  
Fixed Support

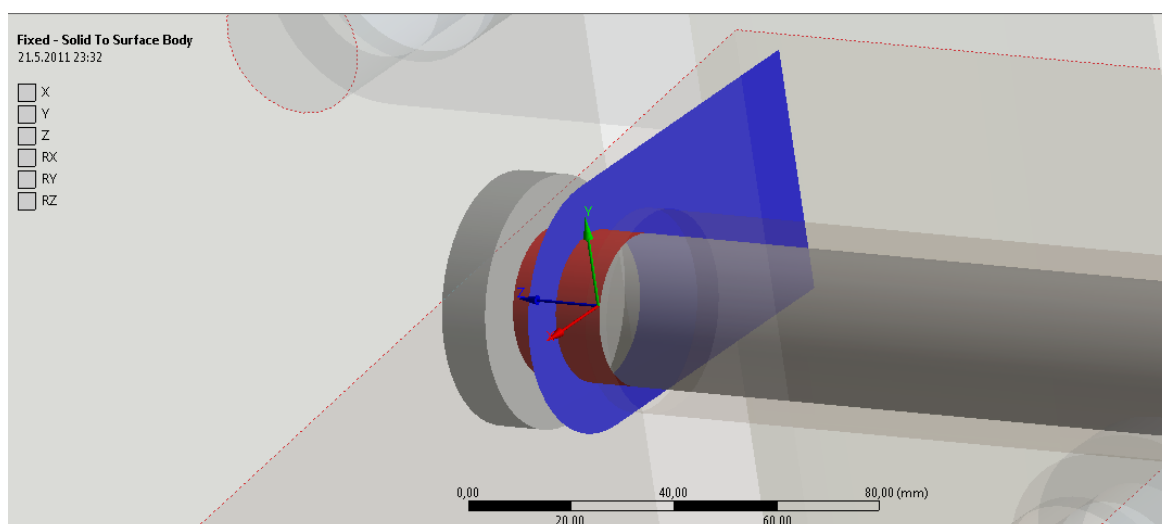


Obrázek 5.9 - uložení soustavy

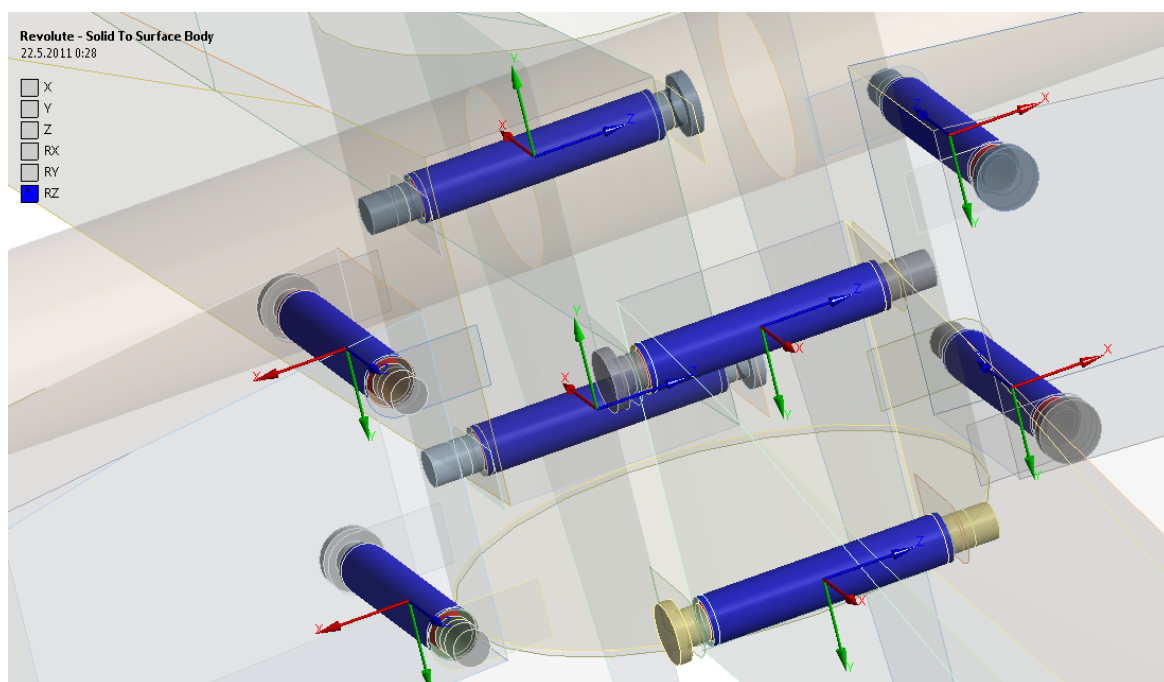
V modelu klece jsou také klouby rotační (nepřenášející krouticí moment) a pevné (přenášející krouticí moment). Náhled pevných kloubů je znázorněn na obrázku 5.10 a na obrázku 5.12 jsou klouby rotační. Pevné klouby byly použity mezi uchycením a čepem (viz obrázek 5.11). Čep byl spojen s domečkem rotační vazbou (viz obrázek 5.13). Tyto klouby byly v modelu definovány z důvodu spojení prostorové geometrie s neutrální plochou.



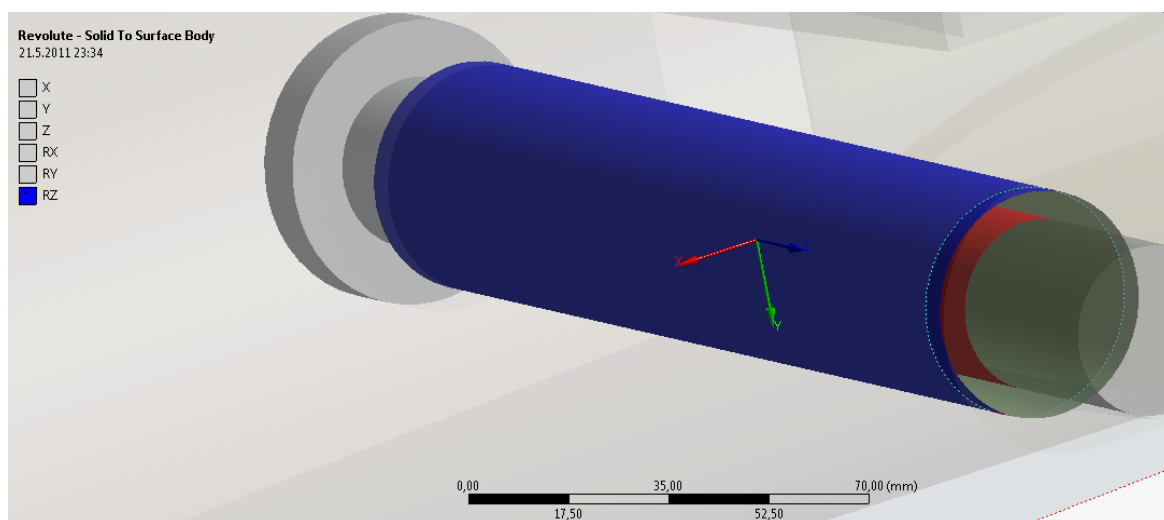
Obrázek 5.10 – náhled pevných kloubů



Obrázek 5.11 – detail pevného kloubu



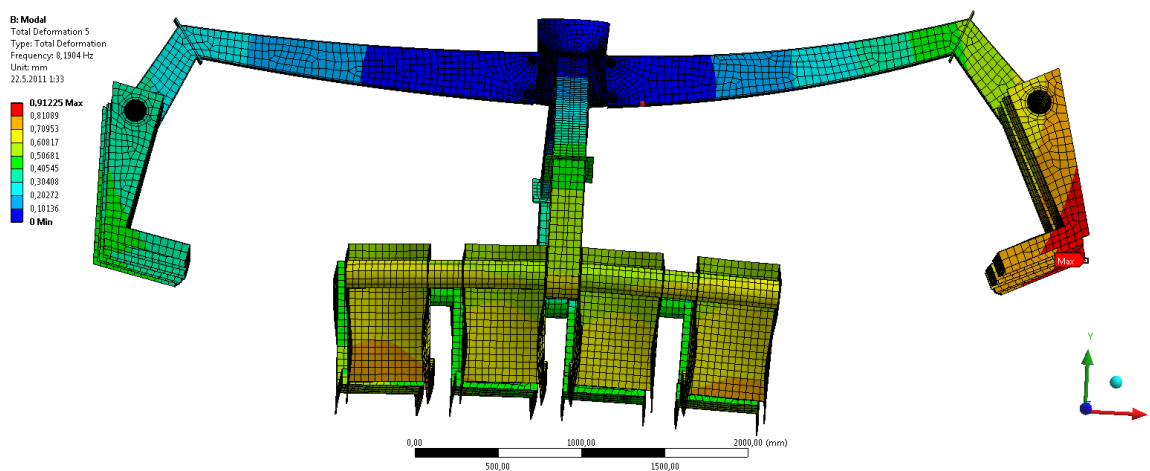
Obrázek 5.12 – náhled rotačních kloubů



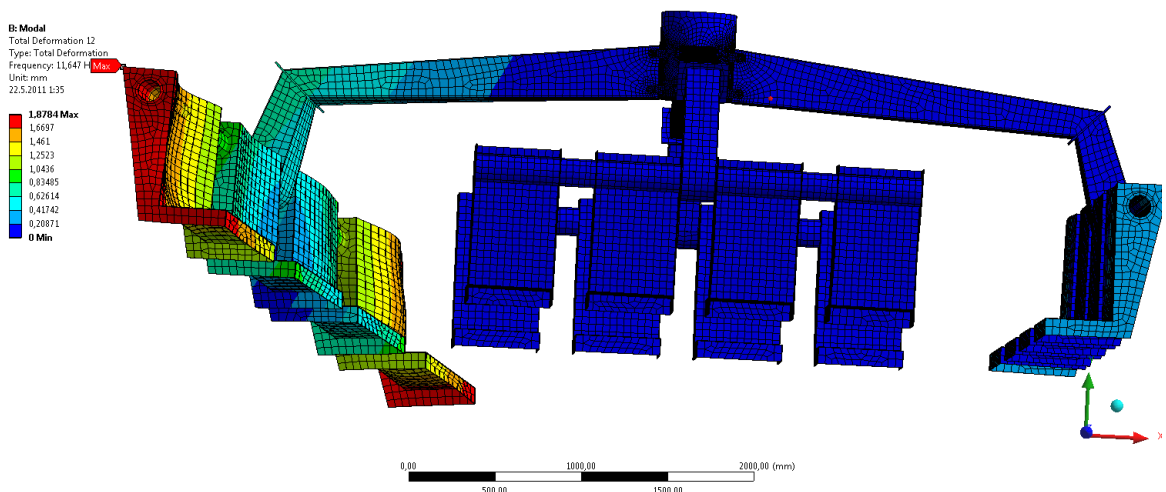
Obrázek 5.13 – detail rotačního kloubu

## 5.5. Modální analýza

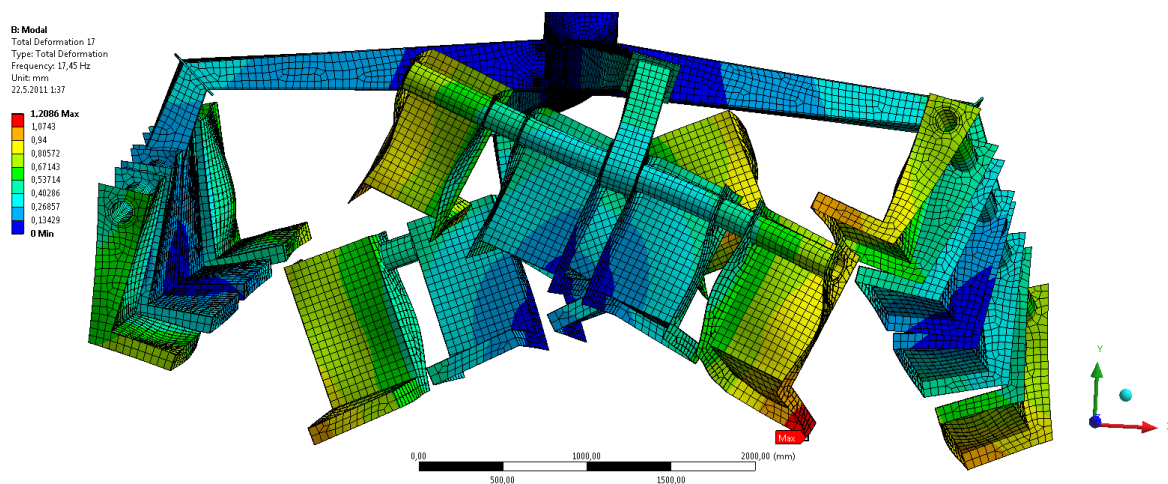
Modální analýza v této práci byla provedena za účelem zjištění vlastních frekvencí a tvarů, které mohou nastat. Modální analýza byla provedena také proto, aby došlo k určení míst s maximální výchylkou a zjistili se nebezpečné provozní stavy, za kterých se zařízení nesmí provozovat. Z analýzy byly vybrány tři vlastní tvary (obrázek 5.14, obrázek 5.15 a obrázek 5.16). Modální analýza se také provádí z důvodu kontroly správnosti výpočtového modelu, například spojení neutrálních ploch. Model byl ukotven shodně jako na obrázku 5.9. Hodnoty vlastních frekvencí jsou zapsány v tabulce 5.1.



Obrázek 5.14 – první vybraný vlastní tvar



Obrázek 5.15 – druhý vybraný vlastní tvar



Obrázek 5.16 – třetí vybraný vlastní tvar

	Frekvence; [Hz]	Druh
1	6,6944	Ohyb gondol
2	8,1904	Kroucení gondol
3	8,3981	Krut gondoly
4	8,4606	Krut gondol
5	9,6645	Ohyb gondol
6	10,857	Krut gondol

Tabulka 5.1 – hodnoty frekvencí

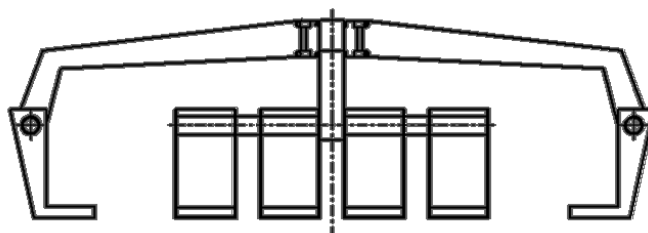


## 5.6 Výsledky pro různé polohy

Vzhledem ke kyvnému pohybu klece bylo vybráno pět různých pozic během provozu od  $0^\circ$  do  $120^\circ$  s krokem  $30^\circ$ .

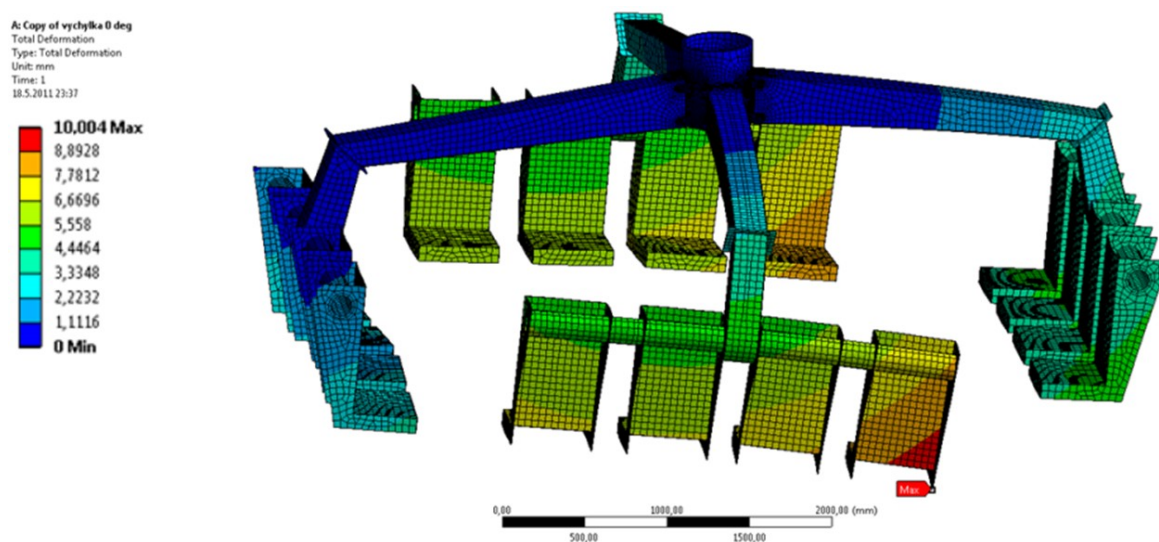
### 5.6.1 První pozice - výchylka $0^\circ$

Výchylka  $0^\circ$  je naznačena na obrázku 5.16.



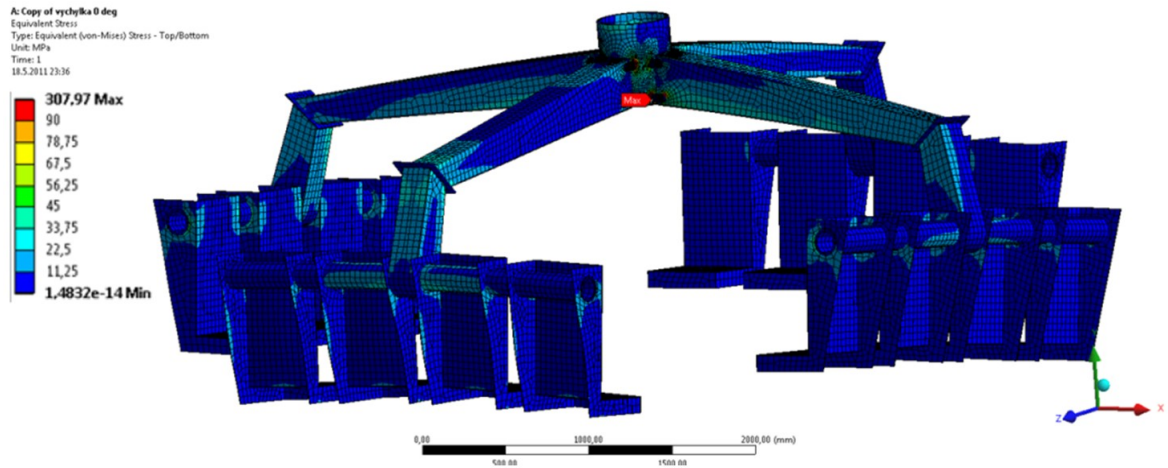
Obrázek 5.16 – výchylka klece  $0^\circ$

Průběh celkového posunutí celé konstrukce při nulové výchylce je znázorněn na obrázku 5.17. Maximální hodnota posunutí je 10 mm a to v místě vyznačeném nápisem Max.



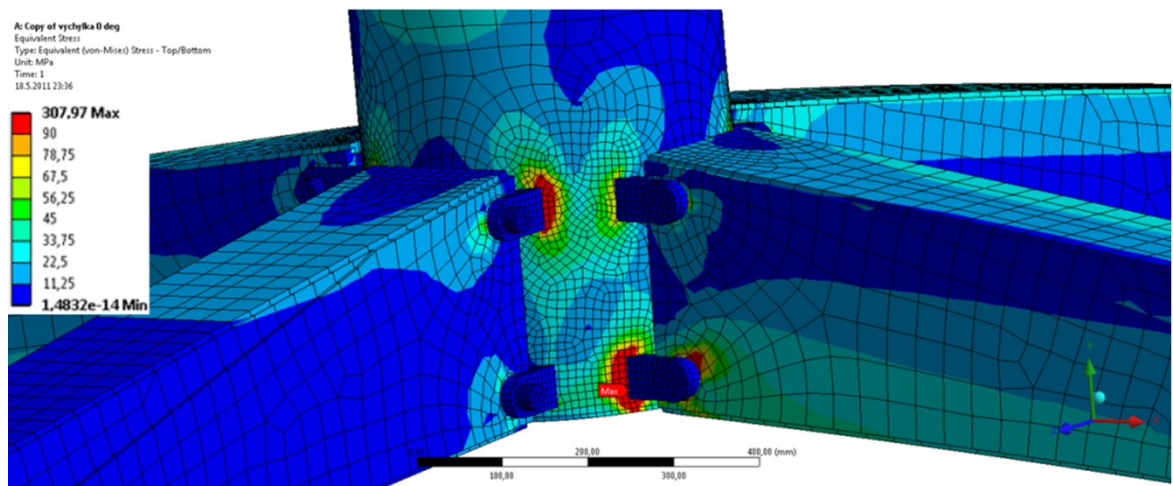
Obrázek 5.17 - průběh posunutí v celé konstrukci (výchylka  $0^\circ$ ); [mm]

Průběh redukovaného napětí v celé soustavě při nulové výchylce je zobrazen na obrázku 5.18. Maximální hodnota napětí 308 MPa se nachází na kyvném rameni v místě označeném nápisem Max.



Obrázek 5.18 - průběh napětí v celé konstrukci (výchylka 0°); [MPa]

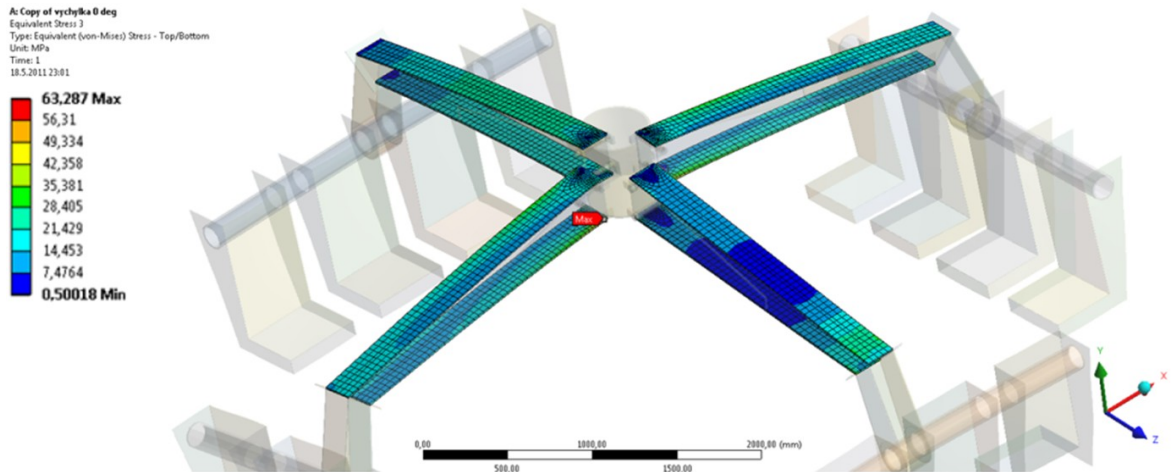
Detail průběhu redukovaného napětí na kyvném rameni je znázorněn na obrázku 5.19. Na obrázku jsou vidět červeně zbarvená pole, ta značí hodnotu napětí vyšší než zvolených referenčních 90 MPa. Je vidět, že tato oblast je poddimenzovaná a bude dále podrobněji řešena v kapitole 5.8.



Obrázek 5.19 – detail průběhu napětí v celé konstrukci (výchylka 0°); [MPa]

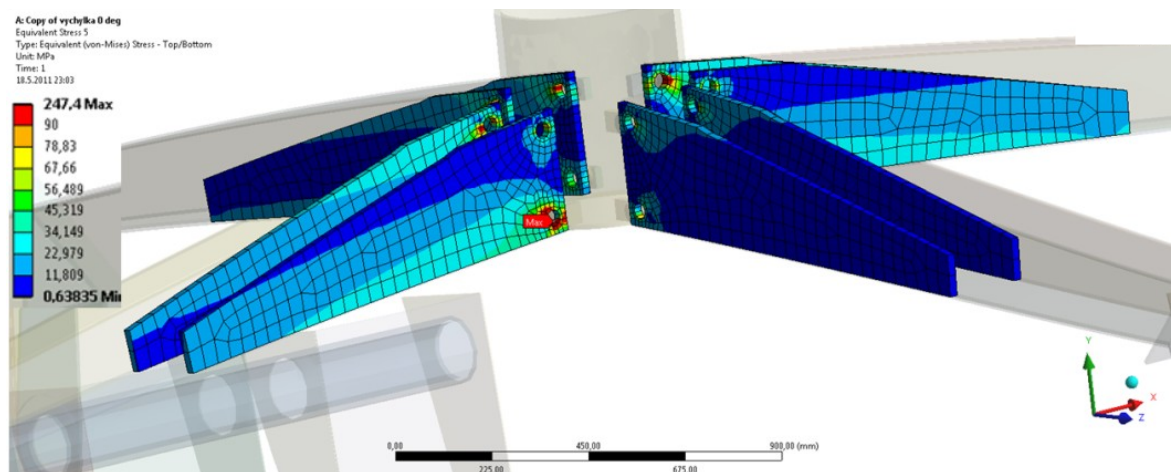


Průběh redukovaného napětí v horní a dolní desce při nulové výchylce je znázorněn na obrázku 5.20. Maximální hodnota napětí je 64 MPa v místě vyznačeném nápisem Max. Na deskách je vidět, že napětí je rozloženo rovnoměrně po celé desce.



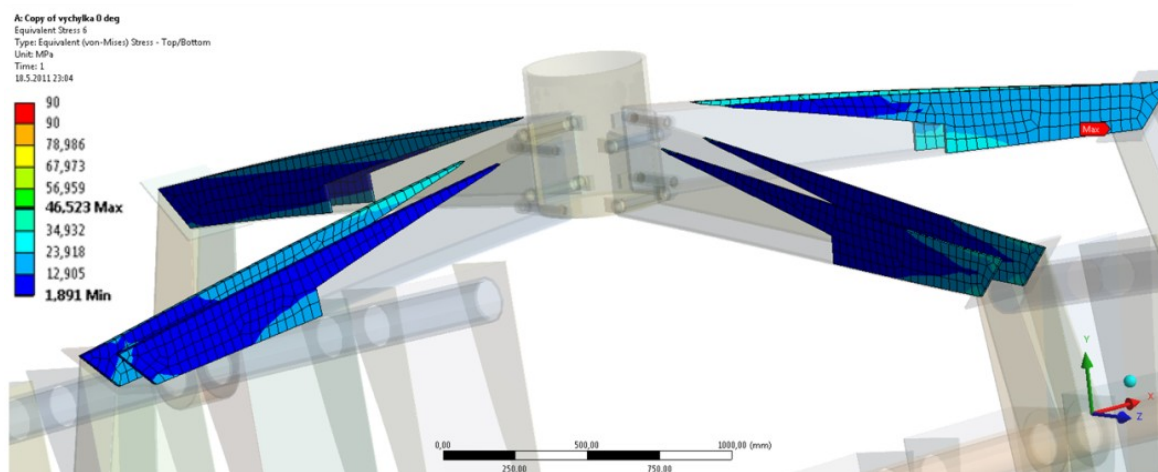
Obrázek 5.20 - průběh napětí v horních a spodních deskách (výchylka 0°); [MPa]

Průběh redukovaného napětí v bočních výztužných deskách je znázorněn na obrázku 5.21. Z detailu průběhu redukovaného napětí v bočních deskách (obrázek 5.24) je jasné vidět vznik špičky napětí. Tato špička je způsobena zjednodušením na skořepinové prvky. K posouzení pevnosti je proto zapotřebí brát v úvahu výsledek ze vzdálenějšího místa výskytu singularity, kde je napětí 79 MPa.



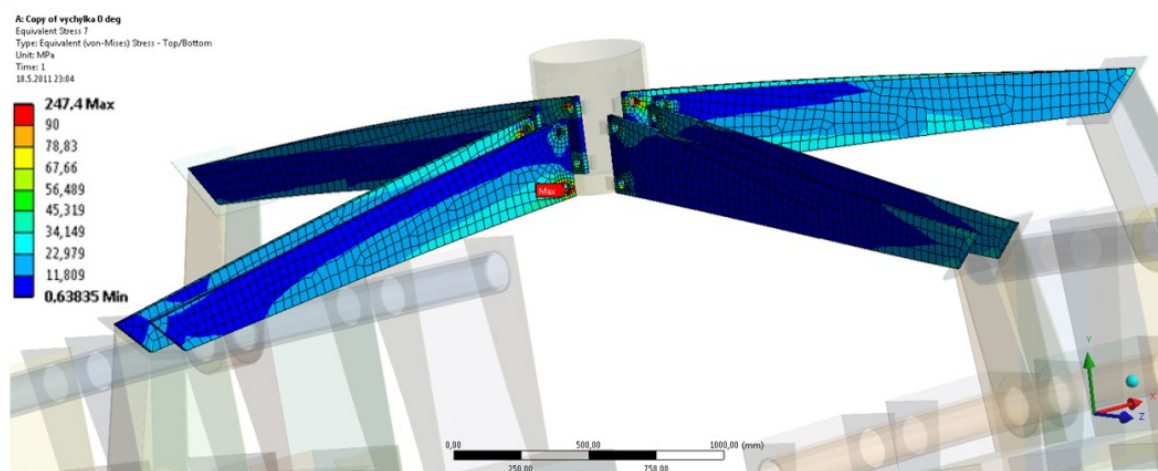
Obrázek 5.21 - průběh napětí v bočních výztužných deskách (výchylka 0°); [MPa]

Průběh redukovaného napětí v bočních navazujících deskách je znázorněn na obrázku 5.22. Je patrné, že redukované napětí nepřekročilo referenční hodnotu 90 MPa. Maximální hodnota redukovaného napětí je 47 MPa.

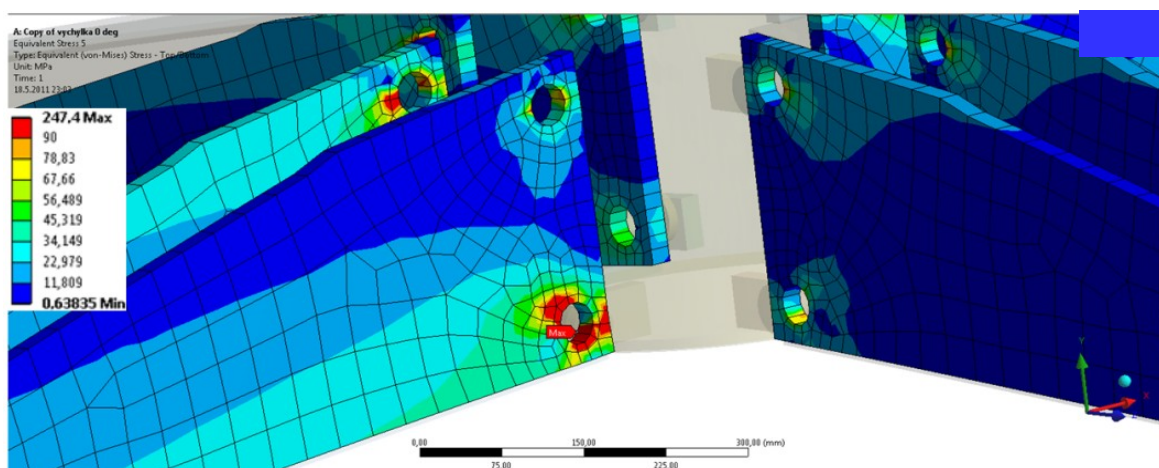


Obrázek 5.22 - průběh napětí v bočních navazujících deskách (výchylka 0°); [MPa]

Průběh redukovaného napětí v bočních deskách je znázorněn na obrázku 5.23 a detail průběhu redukovaného napětí na obrázku 5.24.



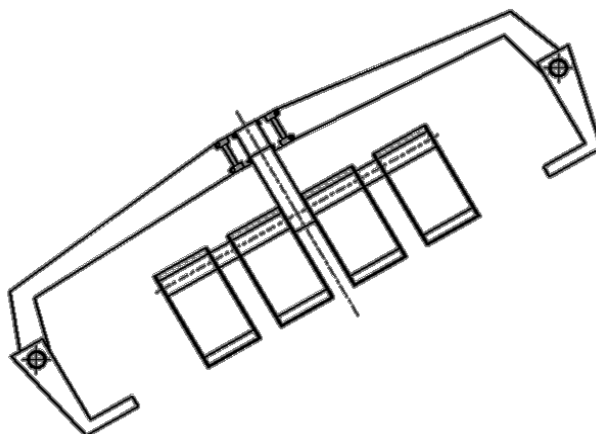
Obrázek 5.23 - průběh napětí v bočních deskách (výchylka 0°); [MPa]



Obrázek 5.24 - detail průběhu napětí v bočních deskách (výchylka 0°); [MPa]

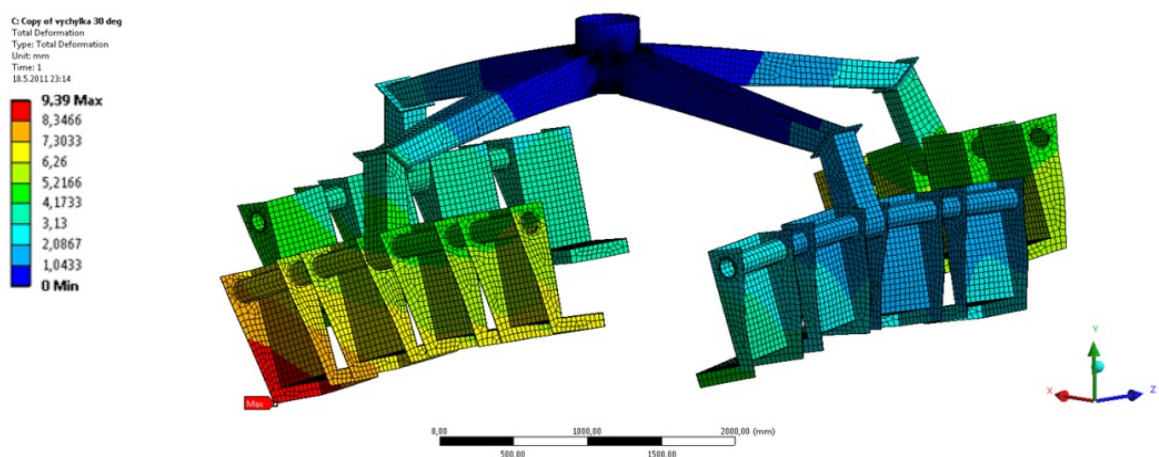
## 5.6.2 Druhá pozice – výchylka 30°

Výchylka je znázorněna na obrázku 5.25.



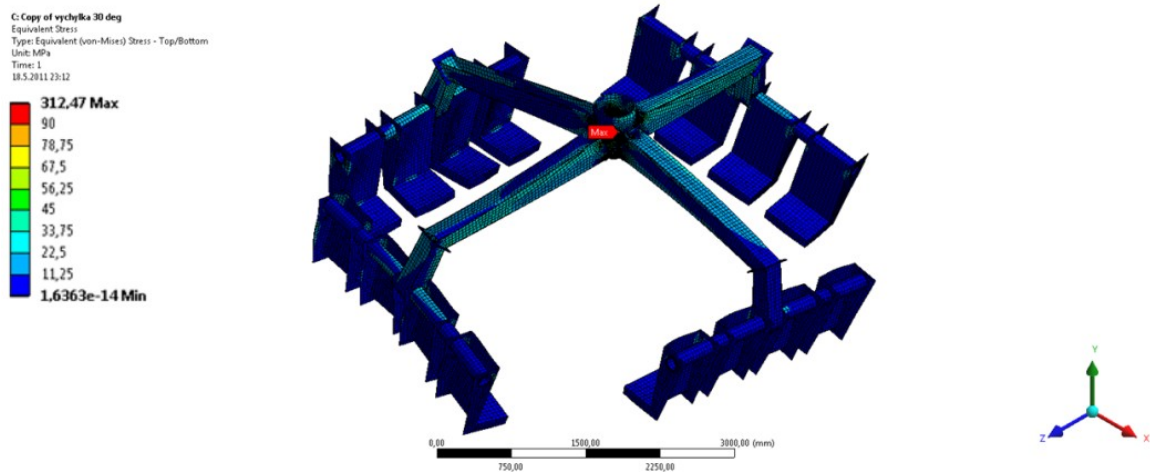
Obrázek .5.25 - výchylka klece 30°

Průběh celkového posunutí celé konstrukce při výchylce 30° je znázorněn na obrázku 5.26. Maximální hodnota posunutí je 9,4 mm, a to v místě vyznačeném nápisem Max.



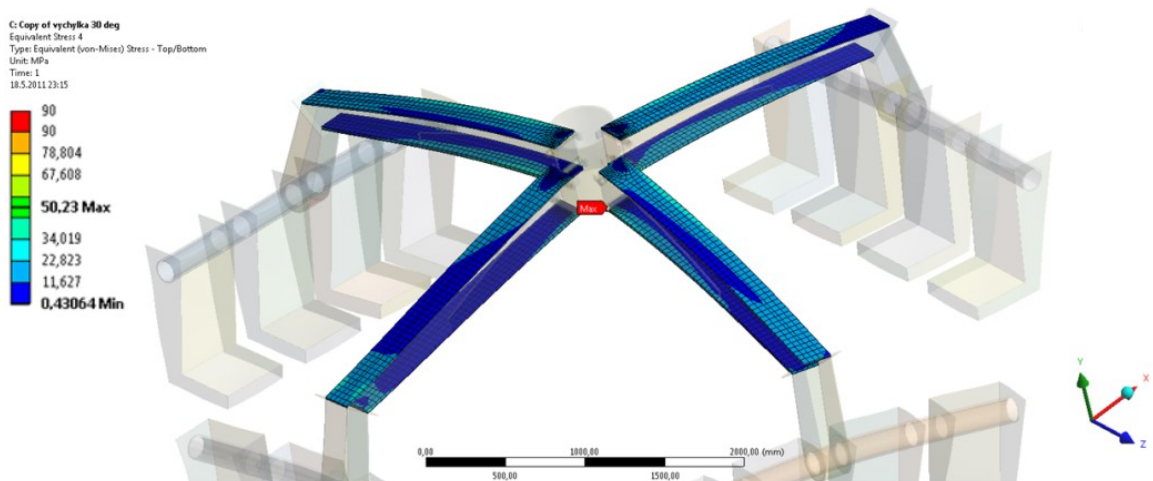
Obrázek 5.26 - průběh posunutí v celé konstrukci (výchylka 30°); [mm]

Průběh redukovaného napětí v celé konstrukci při výchylce  $30^\circ$  je zobrazen na obrázku 5.27. Maximální hodnota napětí 313 MPa se nachází na kyvném rameni v místě označeném nápisem Max. Je zřejmé, že tato oblast je poddimenzovaná a bude dále podrobněji řešena v kapitole 5.8.



Obrázek 5.27 - průběh napětí v celé konstrukci (výchylka  $30^\circ$ ); [MPa]

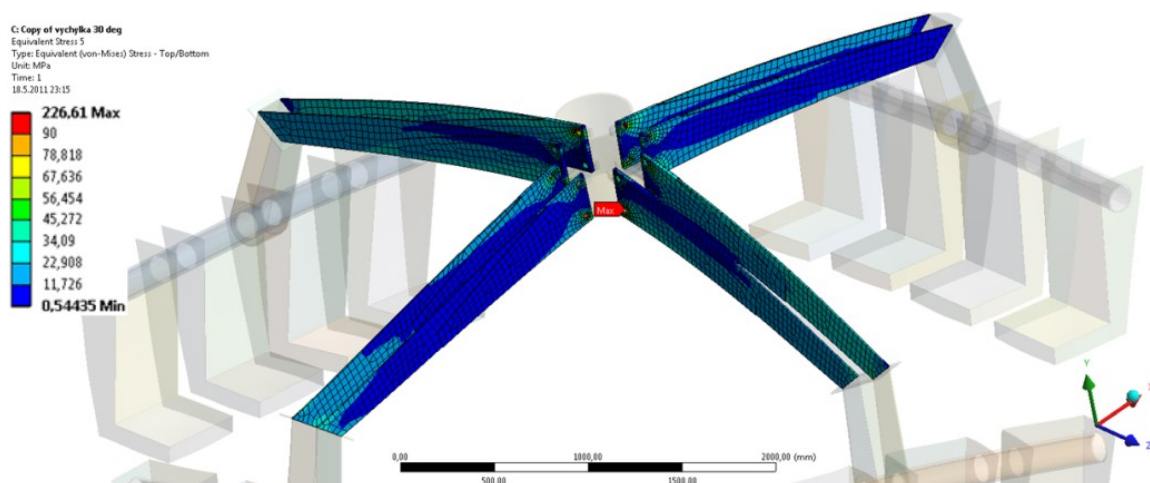
Průběh redukovaného napětí v horní a dolní desce při výchylce  $30^\circ$  je znázorněn na obrázku 5.28. Maximální hodnota napětí je 51 MPa v místě označeném nápisem Max.



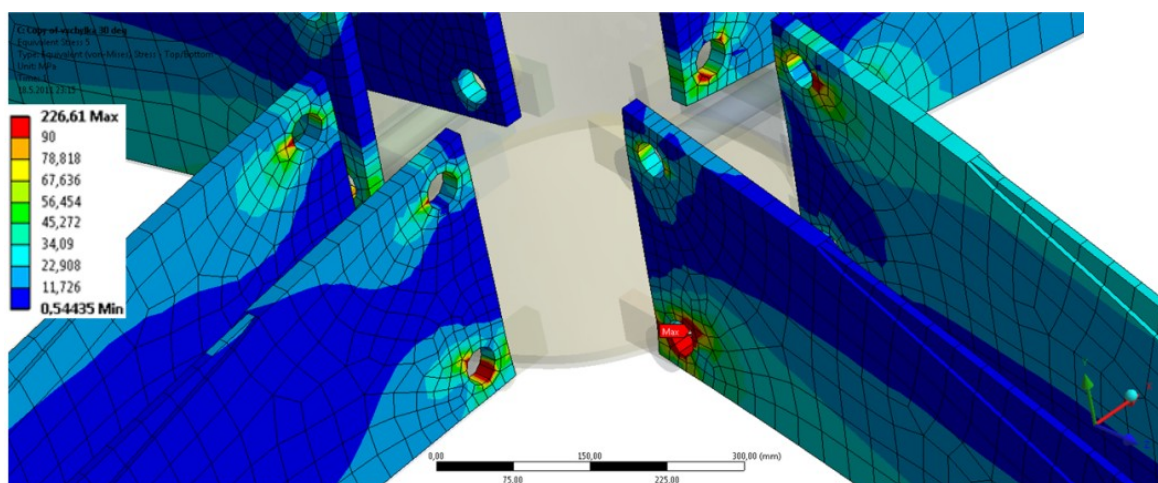
Obrázek 5.28 - průběh napětí v horních a spodních deskách (výchylka  $30^\circ$ ); [MPa]



Průběh redukovaného napětí v bočních deskách je znázorněn na obrázku 5.29. Maximální hodnota napětí je opět v bezprostřední blízkosti otvoru, vzhledem ke špičce napětí vzniklé náhradou na skořepinové prvky, bereme v úvahu napětí z místa vzdálenějšího od otvoru 79 MPa (viz obrázek 5.30).



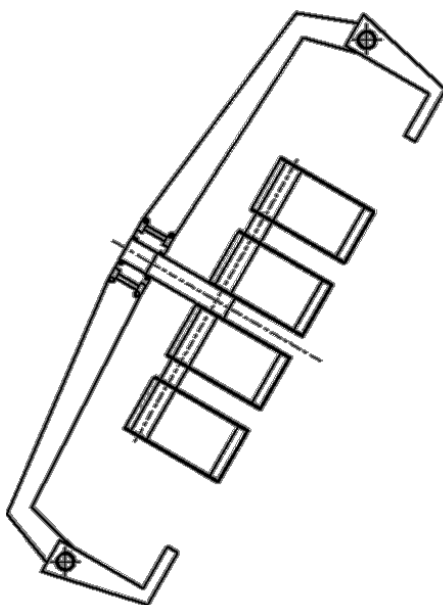
Obrázek 5.29 - průběh napětí v bočních deskách (výchylka 30°); [MPa]



Obrázek 5.30 - detail průběhu napětí v bočních deskách (výchylka 30°); [MPa]

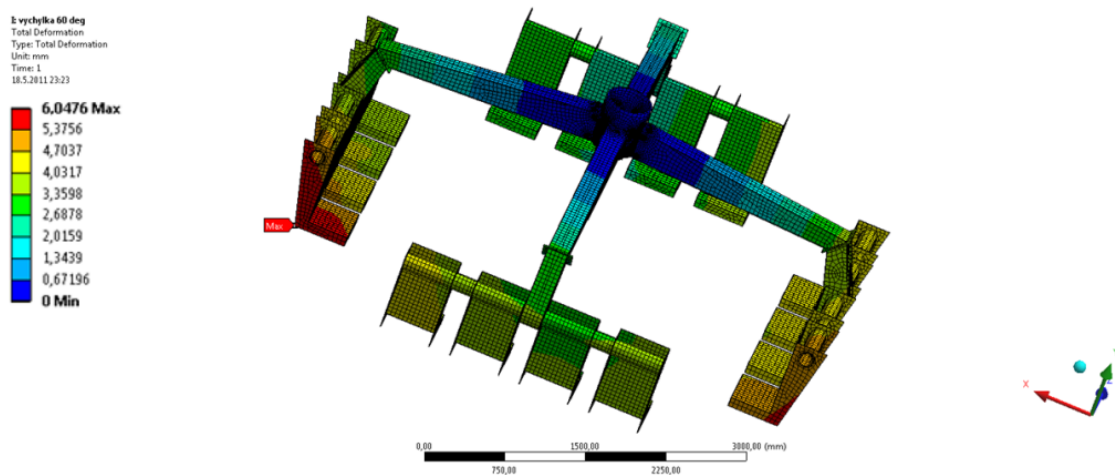
### 5.6.3 Třetí pozice – výchylka 60°

Výchylka 60° je znázorněna na obrázku 5.31.



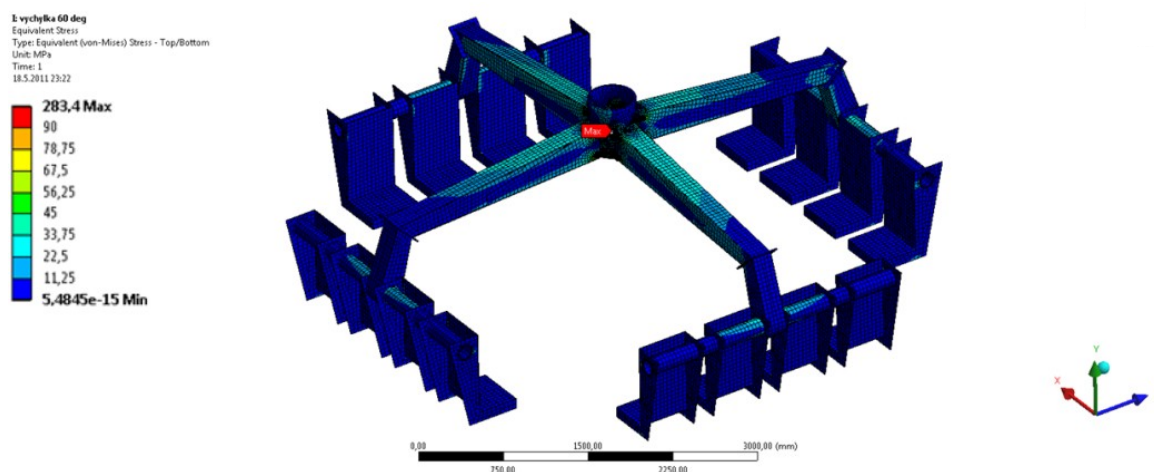
Obrázek 5.31 - výchylka klece 60°

Průběh posunutí celé konstrukce při výchylce 60° je znázorněn na obrázku 5.32. Maximální hodnota posunutí je 6 mm a to v místě vyznačeném nápisem Max.



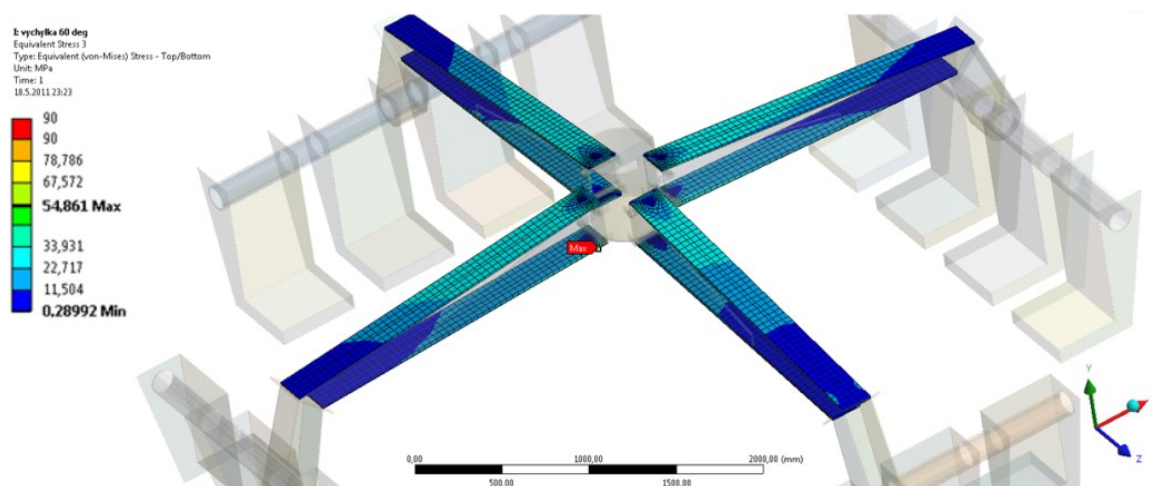
Obrázek 5.32 - průběh posunutí v celé konstrukci (výchylka 60°); [mm]

Průběh redukovaného napětí v celé konstrukci při výchylce  $60^\circ$  je zobrazen na obrázku 5.33. Maximální hodnota napětí 284 MPa se nachází na kyvném rameni v místě označeném nápisem Max. Je vidět, že tato oblast je poddimenzovaná a bude dále podrobněji řešena v kapitole 5.8.



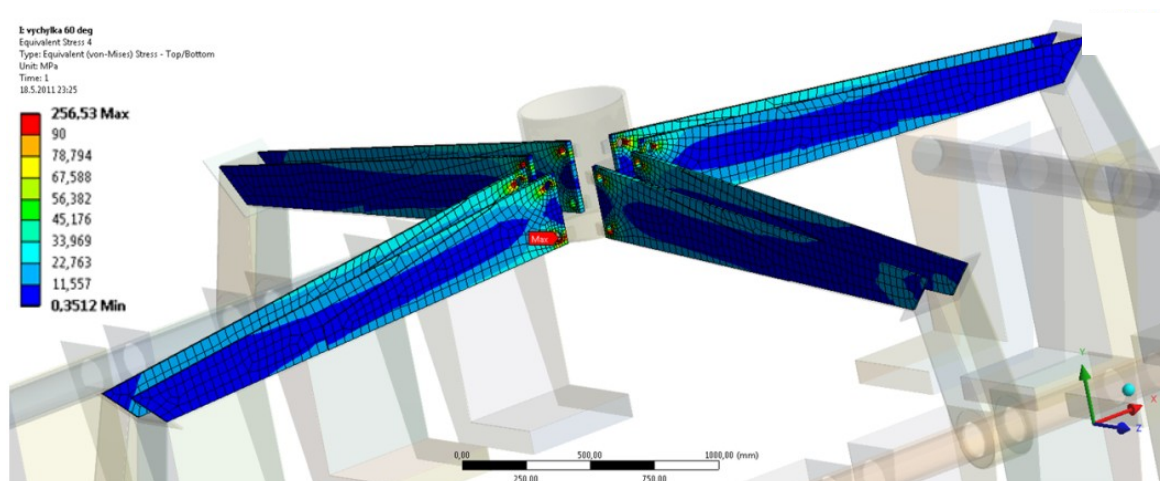
Obrázek 5.33 - průběh napětí v celé konstrukci (výchylka  $60^\circ$ ); [MPa]

Průběh redukovaného napětí v horní a dolní desce při výchylce  $60^\circ$  je znázorněn na obrázku 5.34. Maximální hodnota napětí je 55 MPa v místě označeném nápisem Max.

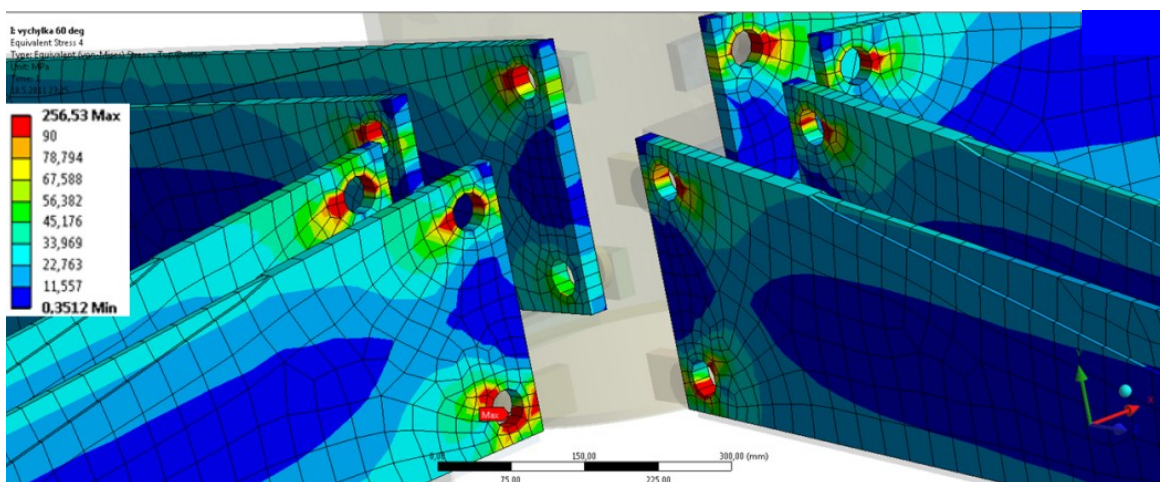


Obrázek 5.34 - průběh napětí v horních a spodních deskách (výchylka  $60^\circ$ ); [MPa]

Průběh redukovaného napětí v bočních deskách je znázorněn na obrázku 5.35. Maximální hodnota napětí je opět v bezprostřední blízkosti otvoru, vzhledem k špičce napětí vzniklé náhradou za skořepinové prvky, bereme v úvahu napětí z místa vzdálenějšího od otvoru 79 MPa (viz obrázek 5.36).



Obrázek 5.35 - průběh napětí v bočních deskách (výchylka 60°); [MPa]

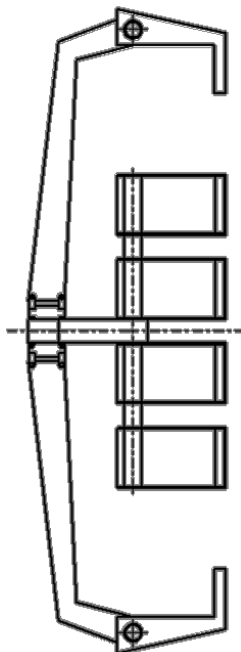


Obrázek 5.36 - detail průběhu napětí v bočních deskách (výchylka 60°); [MPa]



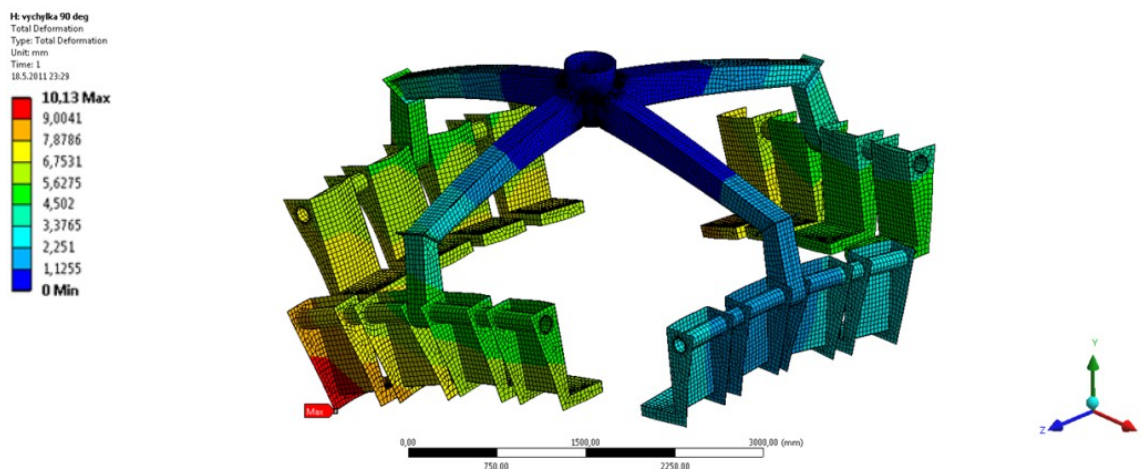
#### 5.6.4 Čtvrtá pozice – výchylka 90°

Výchylka 90° je znázorněna na obrázku 5.37.



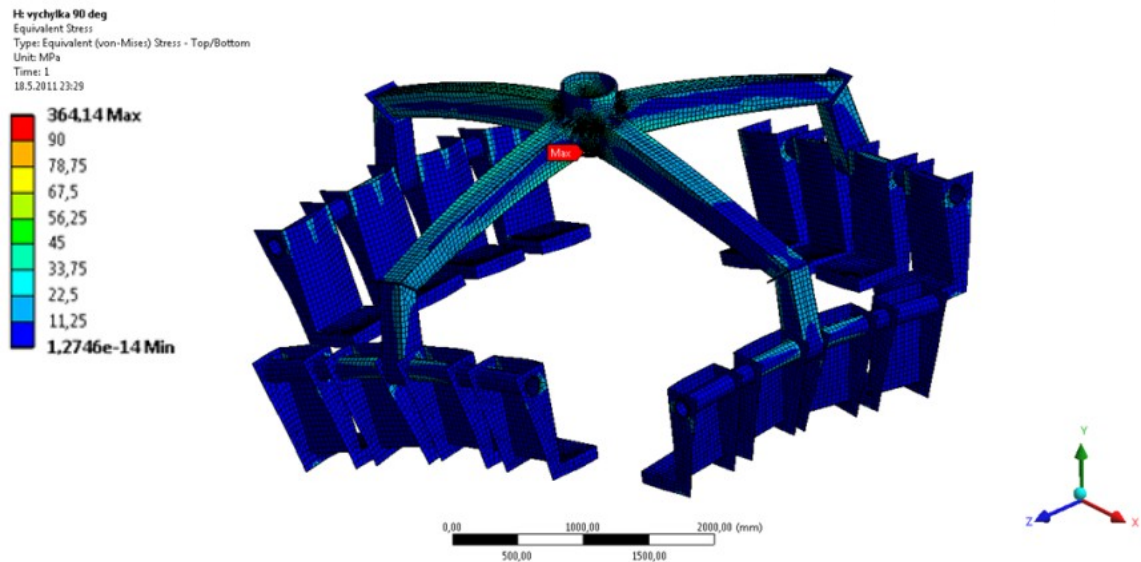
Obrázek 5.37 - výchylka klece 90°

Průběh posunutí celé konstrukce při výchylce 90° je znázorněn na obrázku 5.38. Maximální hodnota posunutí je 10,1 mm a to v místě vyznačeném nápisem Max.



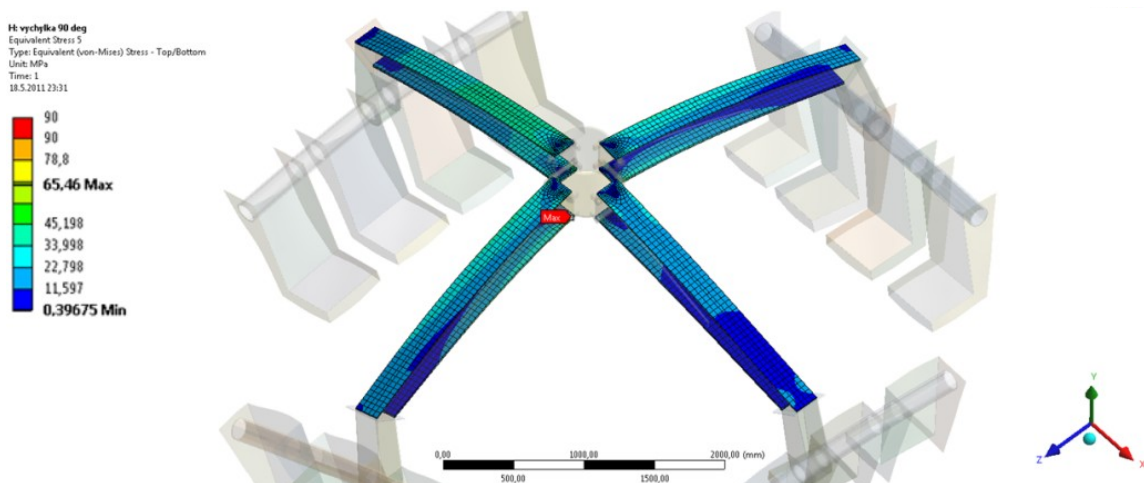
Obrázek 5.38 - průběh posunutí v celé konstrukci (výchylka 90°); [mm]

Průběh redukovaného napětí v celé soustavě při výchylce  $90^\circ$  je zobrazen na obrázku 5.39. Maximální hodnota napětí 365 MPa se nachází na kyvném rameni v místě označeném nápisem Max. Je zřejmé, že tato oblast je poddimenzovaná a bude dále podrobněji řešena v kapitole 5.8.



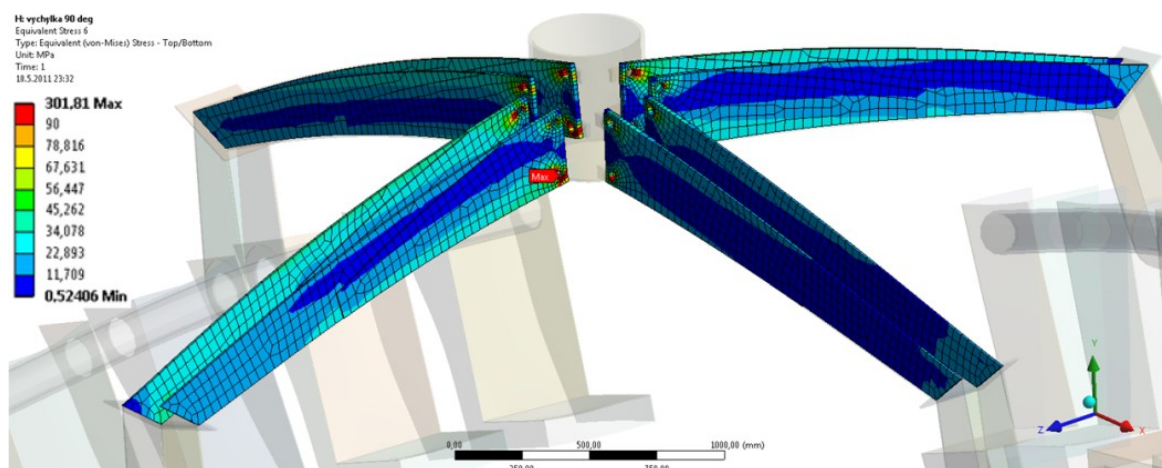
Obrázek 5.39 - průběh napětí v celé konstrukci (výchylka  $90^\circ$ ); [MPa]

Průběh redukovaného napětí v horní a dolní desce při výchylce  $90^\circ$  je znázorněn na obrázku 5.40. Maximální hodnota napětí je 66 MPa v místě označeném nápisem Max.

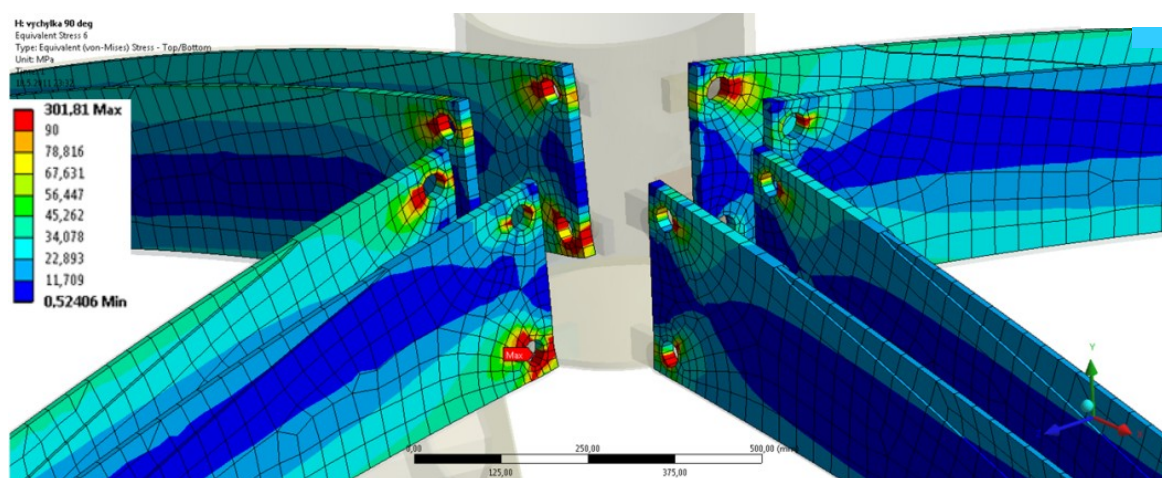


Obrázek 5.40 - průběh napětí v horních a spodních deskách (výchylka  $90^\circ$ ); [MPa]

Průběh redukovaného napětí v bočních deskách je znázorněn na obrázku 5.41. Maximální hodnota napětí je opět v bezprostřední blízkosti otvoru, vzhledem ke špičce napětí vzniklé náhradou skořepinovými prvky, bereme v úvahu napětí z místa vzdálenějšího od otvoru 79 MPa (viz obrázek 5.42).



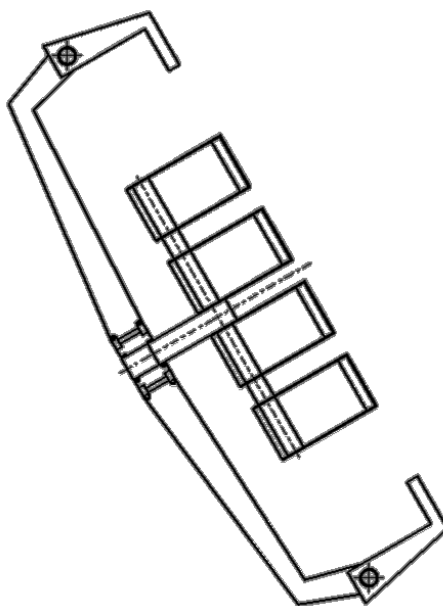
Obrázek 5.41 - průběh napětí v bočních deskách (výchylka 90°); [MPa]



Obrázek 5.42 - detail průběhu napětí v bočních deskách (výchylka 90°); [MPa]

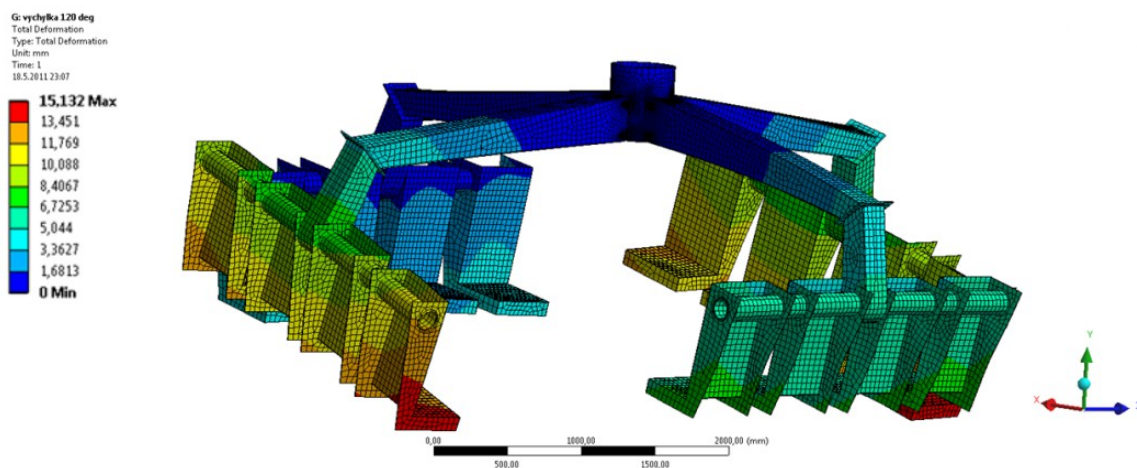
### 5.6.5 Pátá pozice – výchylka 120°

Výchylka 120° je znázorněna na obrázku 5.43.



Obrázek 5.43 - výchylka klece 120°

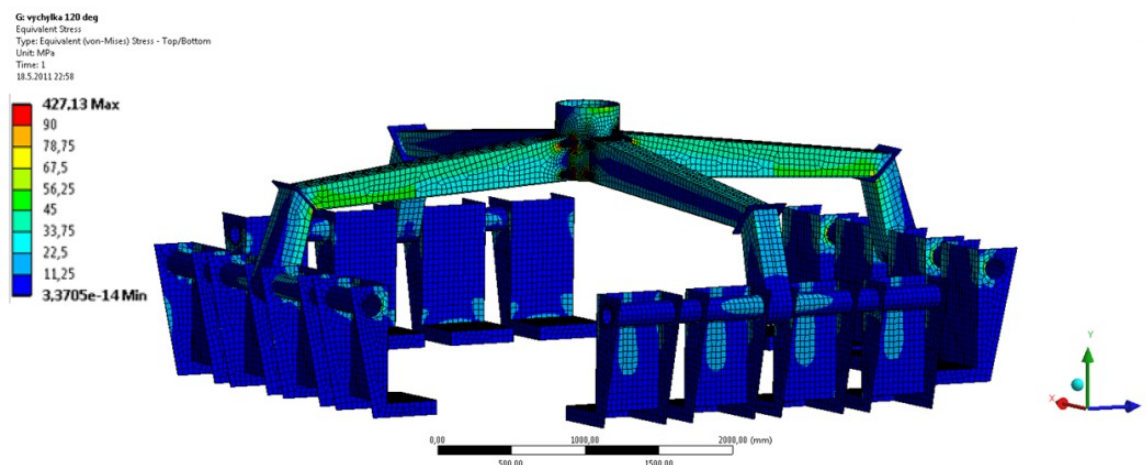
Průběh posunutí celé konstrukce při výchylce 120° je znázorněn na obrázku 5.44. Maximální hodnota posunutí je 15,1 mm.



Obrázek 5.44 - průběh posunutí v celé konstrukci (výchylka 120°); [mm]

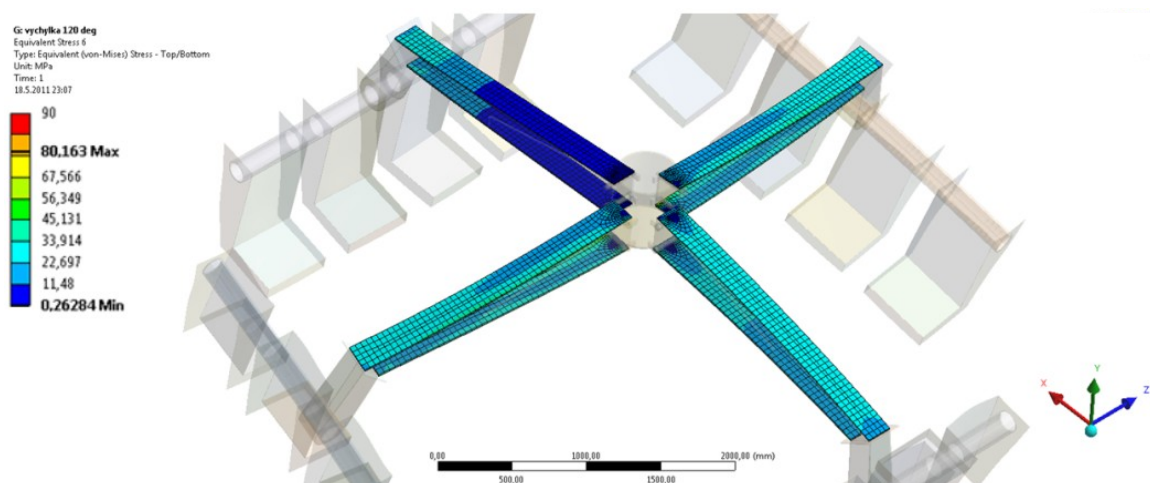


Průběh redukovaného napětí v celé soustavě při výchylce  $120^\circ$  je zobrazen na obrázku 5.45. Maximální hodnota napětí 428 MPa se nachází na kyvném rameni. Je zřejmé, že tato oblast je poddimenzovaná a bude dále podrobněji řešena v kapitole 5.8.



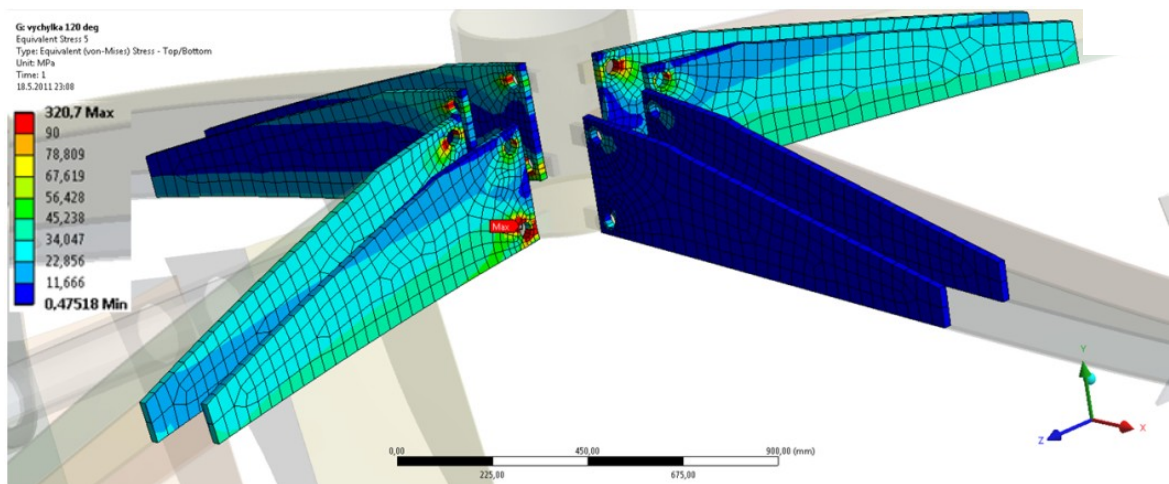
Obrázek 5.45 - průběh napětí v celé konstrukci (výchylka  $120^\circ$ ); [MPa]

Průběh redukovaného napětí v horní a dolní desce při výchylce  $120^\circ$  je znázorněn na obrázku 5.46. Maximální hodnota napětí je 81 MPa.



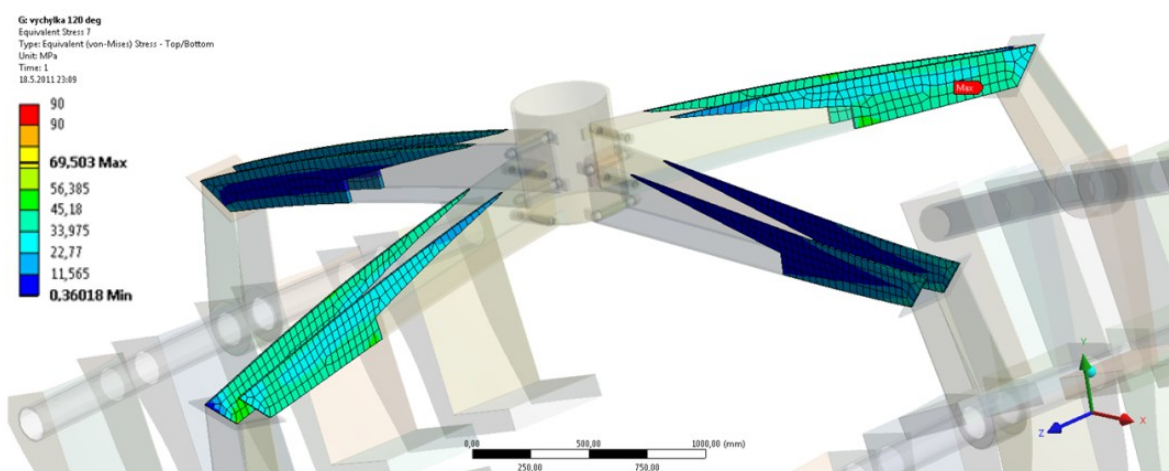
Obrázek 5.46 - průběh napětí v horních a spodních deskách (výchylka  $120^\circ$ ); [MPa]

Průběh redukovaného napětí v bočních výztužných deskách je znázorněn na obrázku 5.47. Maximální hodnota napětí je v místě okolo otvoru, tato maximální hodnota vznikla náhradou na skořepinové prvky, vezme-li se v úvahu výsledek ze vzdálenějšího místa, hodnota redukovaného napětí nepřesahuje hodnotu 79 MPa (viz také obrázek 5.49 a obrázek 5.50). Celkový průběh napětí na boční výztužné desce a boční navazující desce je znázorněn na obrázku 5.49.

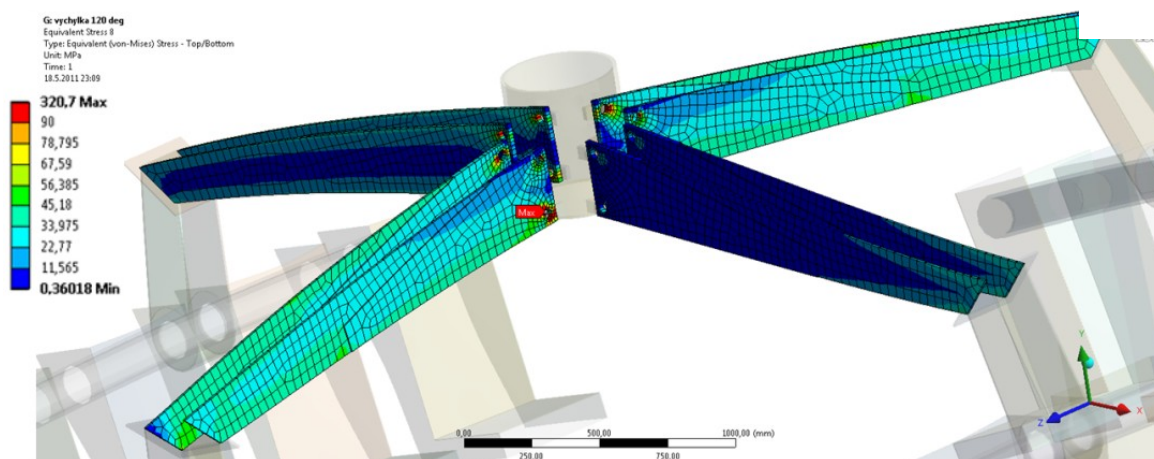


Obrázek 5.47 - průběh napětí v bočních výztužných deskách (výchylka 120°); [MPa]

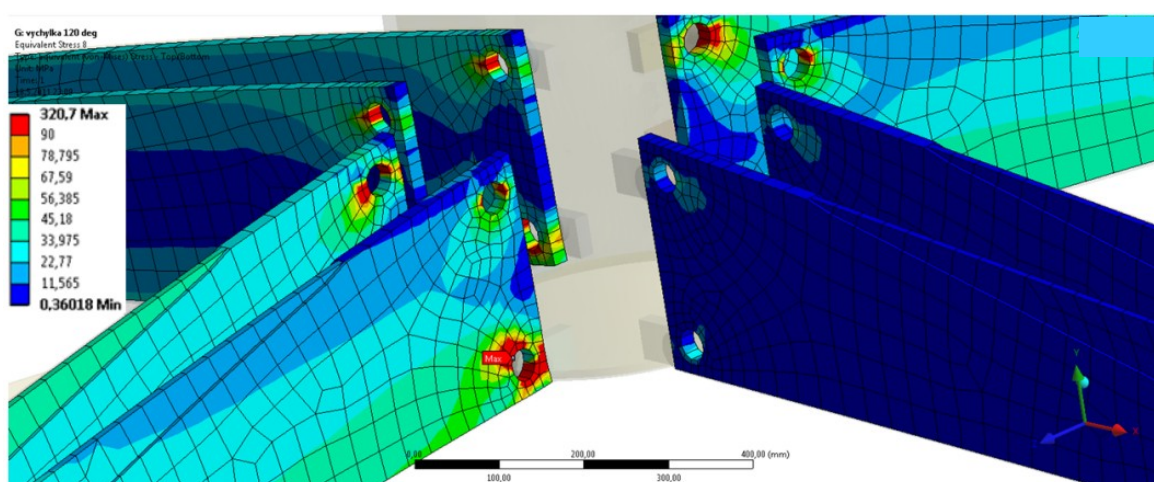
Průběh redukovaného napětí v bočních navazujících deskách je znázorněn na obrázku 5.5.6. Je patrné, že redukované napětí nepřekročilo referenční hodnotu 90 MPa, maximální hodnota redukovaného napětí je v tomto případě 70 MPa.



Obrázek 5.48 - průběh napětí v navazujících deskách (výchylka 120°); [MPa]

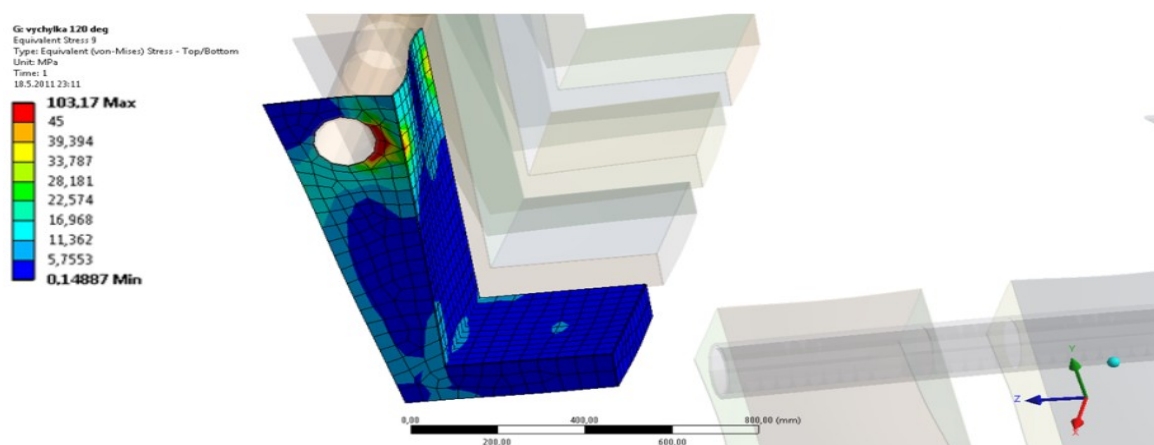


Obrázek 5.49 - průběh napětí v bočních deskách (výchylka 120°); [MPa]



Obrázek 5.50 - detail průběhu napětí v bočních deskách (výchylka 120°); [MPa]

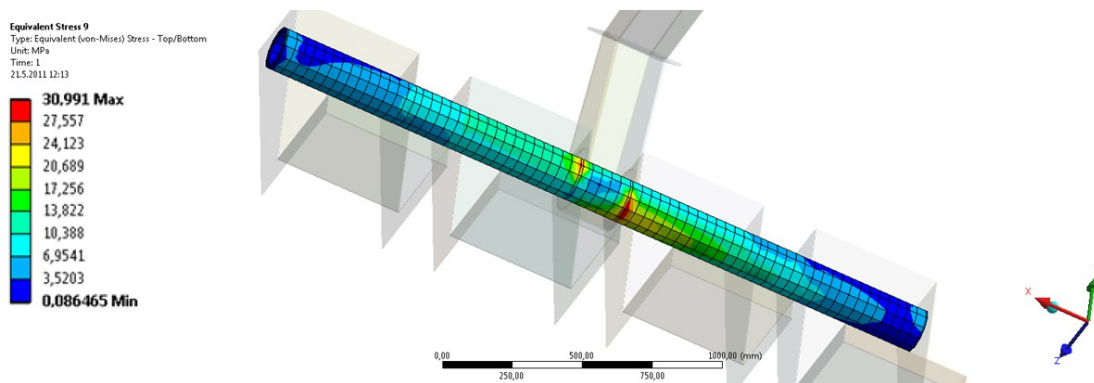
Na obrázku 5.51 je znázorněn průběh napětí na sedačce, maximální hodnota redukovaného napětí je v místě okolo otvoru je 104 MPa. Toto místo představuje nasunutí sedačky na ocelovou trubku (vetknutí).



Obrázek 5.51- průběh napětí v sedačce (výchylka 120°); [MPa]



Průběh redukovaného napětí v ocelové trubce je znázorněn na obrázku 5.52, výsledné maximální redukované napětí je 31 MPa. Toto největší napětí se nachází v místě napojení na nosné rameno (ve vetknutí).



Obrázek 5.52 – průběh napětí v trubce (výchylka 120°); [MPa]

## 5.7 Zhodnocení výsledků

Z výše uvedených výsledků pevnostní analýzy jednoznačně vyplývá, že klec je nejvíce zatížená při maximální výchylce 120°, proto posuzování únosnosti bude provedeno právě pro tento případ. Maximální posunutí celé konstrukce (vyobrazené na obrázku 5.44) je 15,1 mm. Toto celkové posunutí je přípustné. Všechna redukovaná napětí jsou počítána podle hypotézy HMH. Redukované napětí v horní a spodní desce nepřekračuje hodnotu 81 MPa (viz obrázek 5.46), z čehož vyplývá koeficient bezpečnosti vůči mezi únavy v ohybu 1,61. Z průběhu napětí na bočních výztužných deskách je patrné, že největší napětí je v bezprostřední blízkosti děr (321 MPa). Tato špička napětí je způsobena náhradou na skořepinové prvky. Vezmeme-li výsledek v nepatrně větší vzdálenosti od těchto děr, napětí nepřesahuje hodnotu 79 MPa (viz obrázek 50), z čehož vyplývá koeficient bezpečnosti vůči mezi únavy v ohybu 1,6. Bylo by vhodné řešení děr podrobněji analyzovat nebo provést submodelling (není součástí práce). Napětí v navazujících bočních deskách nepřesahuje hodnotu 70 MPa (viz obrázek 48), koeficient bezpečnosti činí 1,87. Maximální napětí v sedačce je 104 MPa v místě otvoru. Koeficient bezpečnosti má tedy hodnotu 1,25. Maximální redukované napětí na trubce nepřesahuje hodnotu 31 MPa, koeficient bezpečnosti nabývá hodnoty 4,2. Hodnoty napětí na součástech klece jsou sepsány v tabulce 5.2, hodnoty celkového posunutí v tabulce 5.3 a hodnoty koeficientů bezpečnosti v tabulce 5.4.



Napětí; [MPa]					
Aoučást	Výchylka 0°	Výchylka 30°	Výchylka 60°	Výchylka 90°	Výchylka 120°
Celá konstrukce	308	313	283	365	428
Horní a dolní desky	64	79	55	66	81
Boční výztužné desky	79	79	79	79	79
Boční navazující desky	47	46	47	46	70
Sedačka	82	59	19	42	104
Trubka	28	30	28	30	31

Tabulka 5.2 – porovnání výsledků napětí

Celkové posunutí; [mm]				
Výchylka 0°	Výchylka 30°	Výchylka 60°	Výchylka 90°	Výchylka 120°
10	9,4	6	10,1	15,1

Tabulka 5.3 – celkové posunutí

Součást	Napětí; [MPa]°	Dovolené napětí; [MPa]	Koeficient bezpečnosti; [mm]
Celá konstrukce	428	130	0,3
Horní a dolní desky	81	130	1,61
Boční výztužné desky	79	130	1,65
Boční navazující desky	70	130	1,86
Sedačka	104	130	1,25
Trubka	31	130	4,2

Tabulka 5.4 - vyhodnocení výsledků

Vzhledem k vysokým hodnotám redukovaného napětí a nízkého koeficientu bezpečnosti v místě uchycení gondol ke kyvnému rameni, bude tato problematika řešena v následující kapitole.

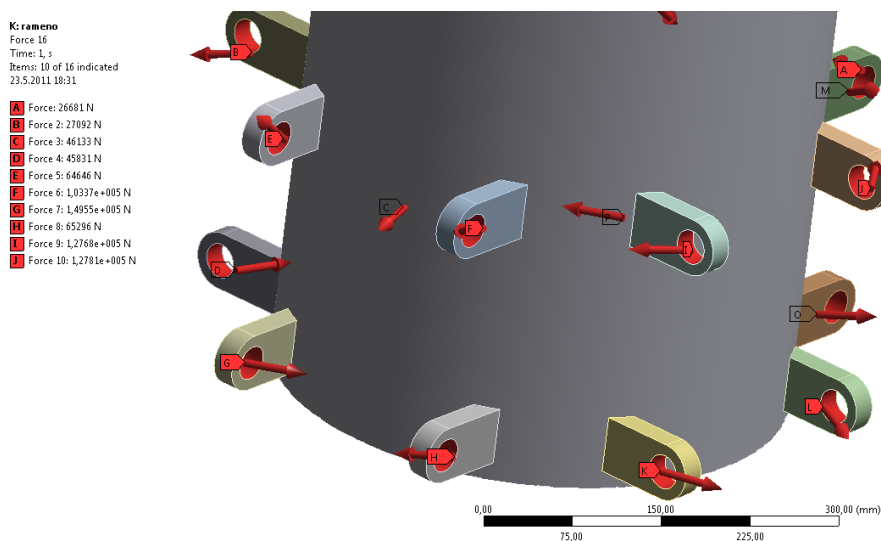
Jelikož celá konstrukce je porovnávána s hodnotou meze únavy v ohybu, nižší koeficienty bezpečnosti si můžeme dovolit.

## 5.8 Návrh uložení gondol ke kyvnému rameni

Vzhledem ke shledání kritického místa v uchycení gondol ke kyvnému rameni, budou tyto konstrukční prvky modelovány jako prostorové „solid“ prvky. Dále bude navrženo několik různých tvarových variant, z nichž bude vybrána optimální. Zatížení bude odpovídat zátěžnému stavu při výchylce  $120^\circ$ , které bylo nejkritičtější.

### 5.8.1 Zatížení

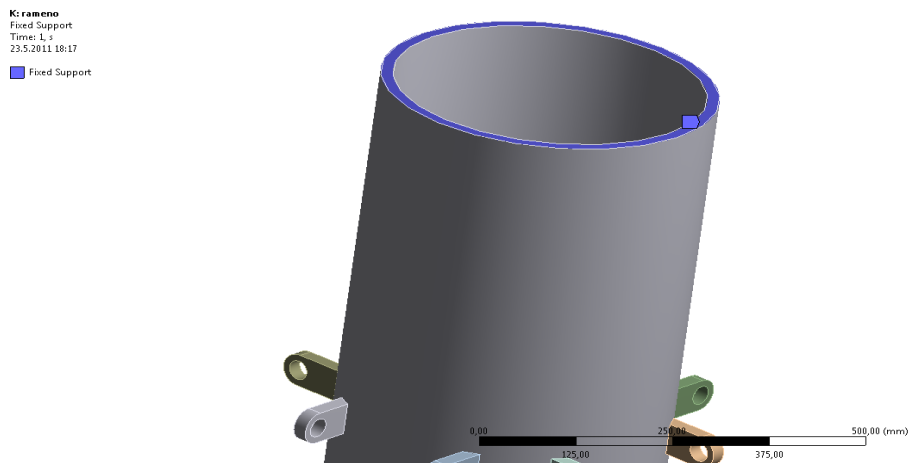
Zatížení bylo provedeno pomocí sil. Velikosti těchto sil byly zjištěny z analýzy při výchylce  $120^\circ$ . Všechny síly byly aplikované na vnitřní plochy děr (viz obrázek 5.53).



Obrázek 5.53 – zadání sil

### 5.8.2 Okrajové podmínky

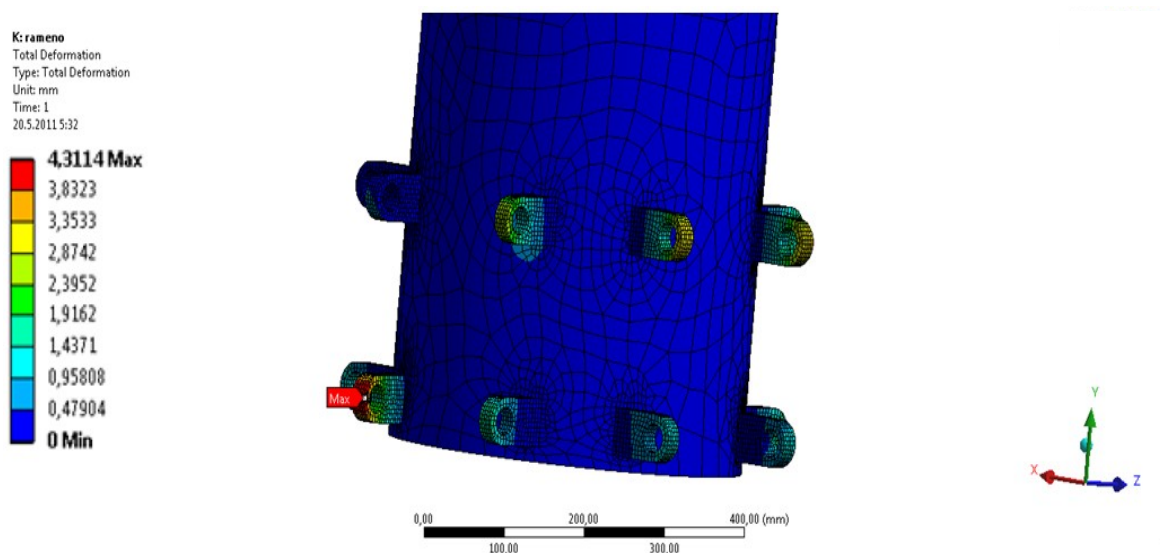
K zabránění všech posuvů a rotací byl model vetknut na modře vyznačenou plochu (viz obrázek 5.54).



Obrázek 5.54 – uložení modelu

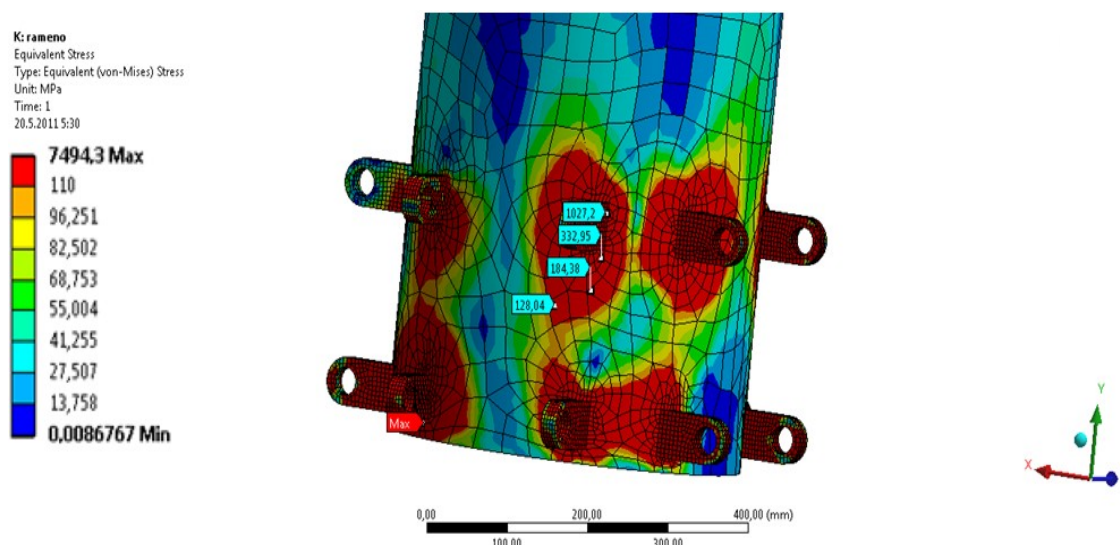
### 5.8.3 Výsledky odlišných variant návrhu uchycení

Na obrázku 4.55 je znázorněn průběh celkového posunutí návrhu uchycení č. 1. Maximální hodnota posunutí je 4,3 mm a je označena nápisem Max



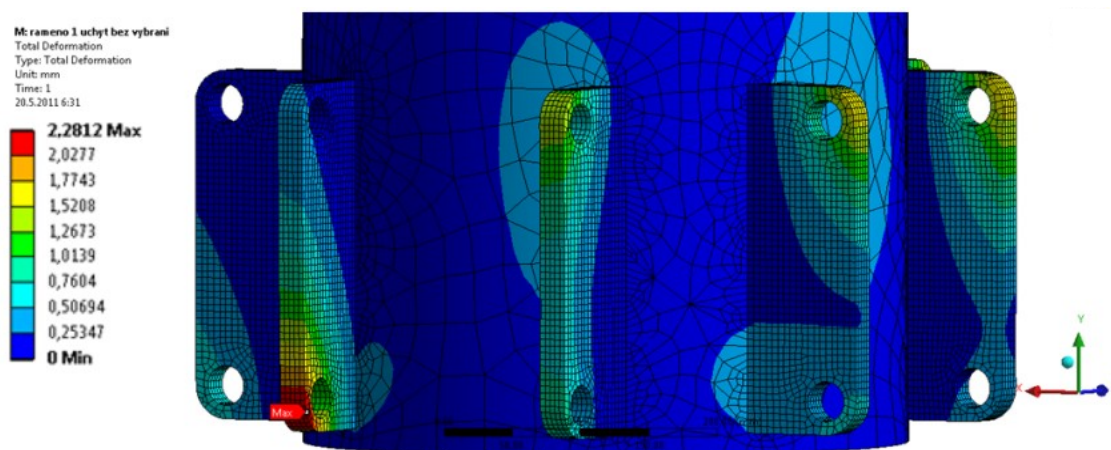
Obrázek 5.55- průběh posunutí v návrhu uchycení č. 1; [mm]

Na obrázku 5.56 je znázorněn průběh redukovaného napětí. Červená pole značí překročení referenční hodnoty napětí 110 MPa. Je zřejmé, že návrh uchycení č. 1 je tedy nevyhovující.



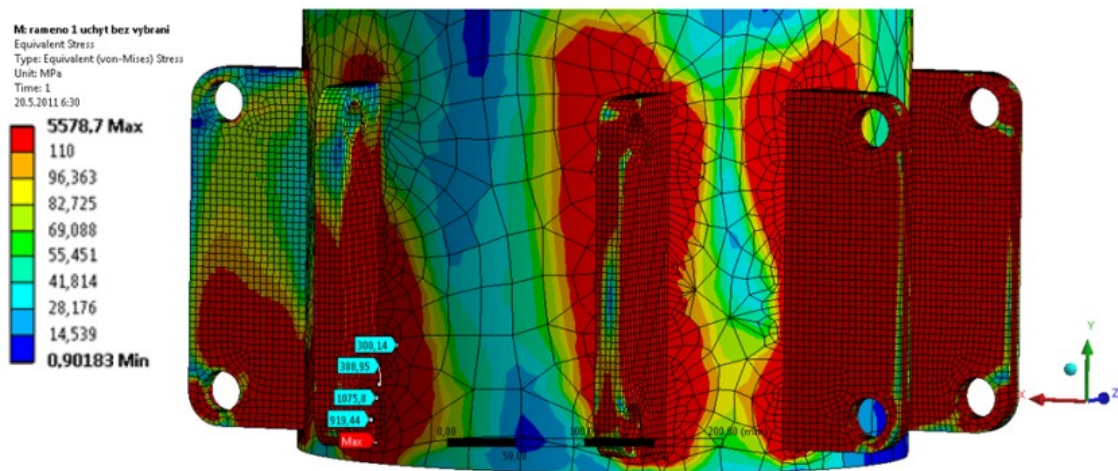
Obrázek 5.56 - průběh napětí v návrhu uchycení č. 1; [MPa]

Vzhledem k velmi vysokému napětí byl další návrh pojat jako spojení dvou úchytů. Maximální hodnota celkového posunutí při návrhu č. 2 je 2,3 mm v místě označeném nápisem Max (viz obrázek 5.57).



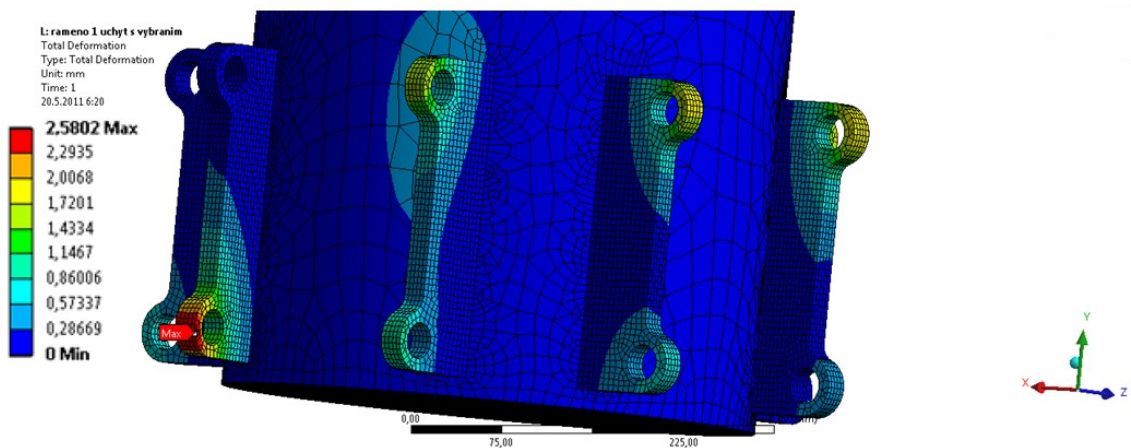
Obrázek 5.57 - průběh posunutí v návrhu uchycení č. 2; [mm]

Z průběhu redukovaného napětí na obrázku 5.58 je patrné zlepšení, avšak hodnota napětí je stále příliš vysoká (znázorněno červenou barvou).



Obrázek 5.58 - průběh napětí v návrhu uchycení č. 2; [MPa]

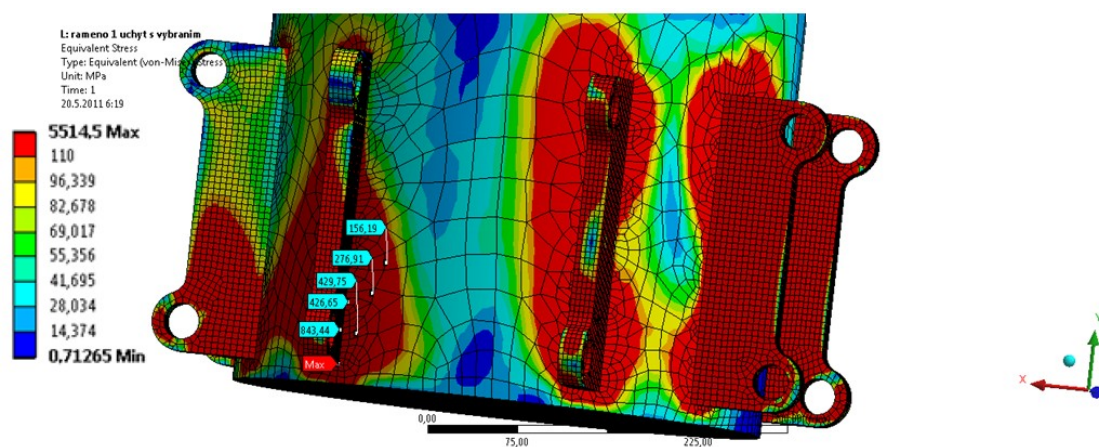
Vzhledem k celkově zatíženým držákům, byl přijat návrh jejich odlehčení a tím i předpokládané změny průběhu napětí. Na obrázku 5.59 je zobrazen průběh celkového posunutí, hodnota posunutí má hodnotu 2,6 mm v místě označeném nápisem Max.



Obrázek 5.59 - průběh posunutí v návrhu uchycení č. 3; [mm]

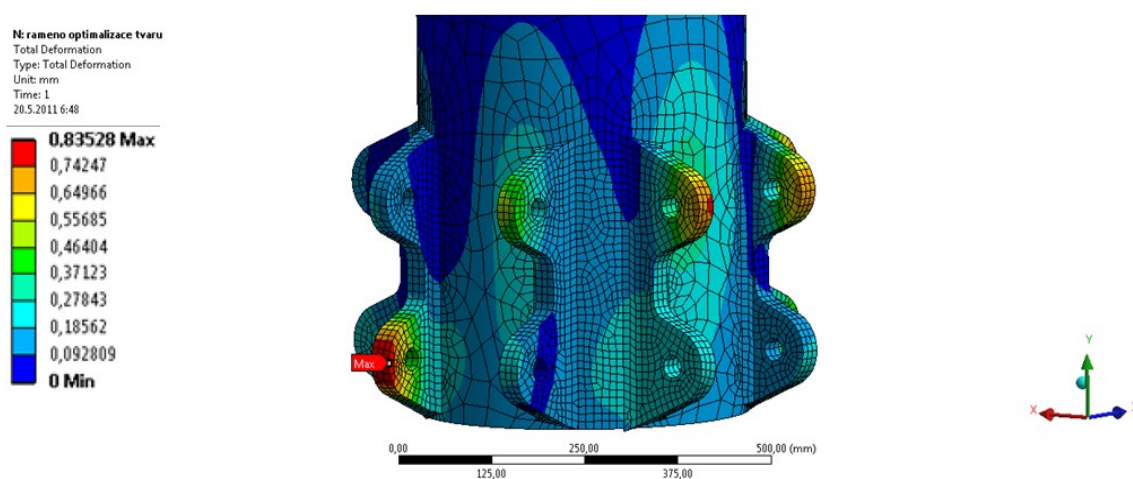


Z obrázku 5.60 je vidět jen nepatrný rozdíl v hodnotě redukovaného napětí oproti předchozímu návrhu. Dále je tedy navrženo razantnější odlehčení (viz obrázek 5.61).



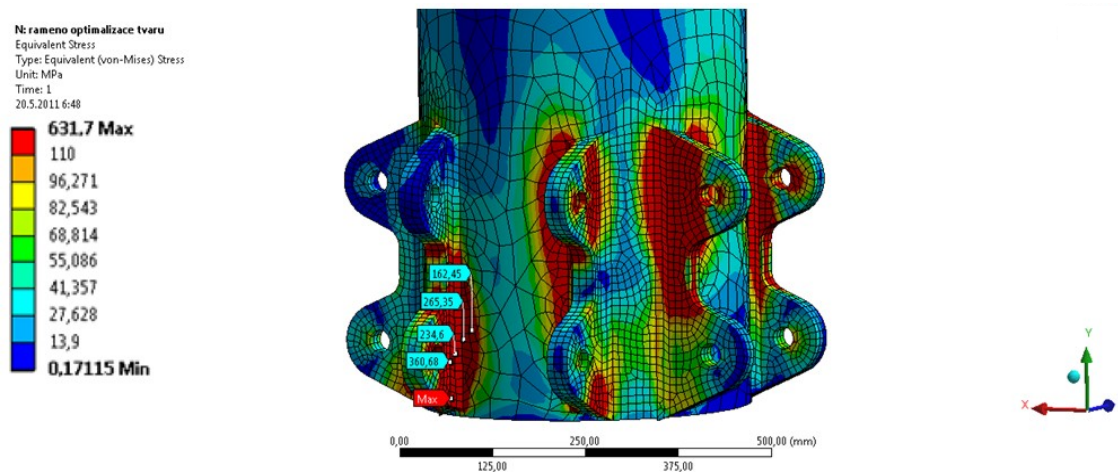
Obrázek 5.60 - průběh napětí v uchycení č. 3; [MPa]

Na obrázku 5.61 je znázorněn průběh celkového posunutí návrhu uchycení č.4. Maximální hodnota posunutí je 0,8 mm a je označena nápisem Max.



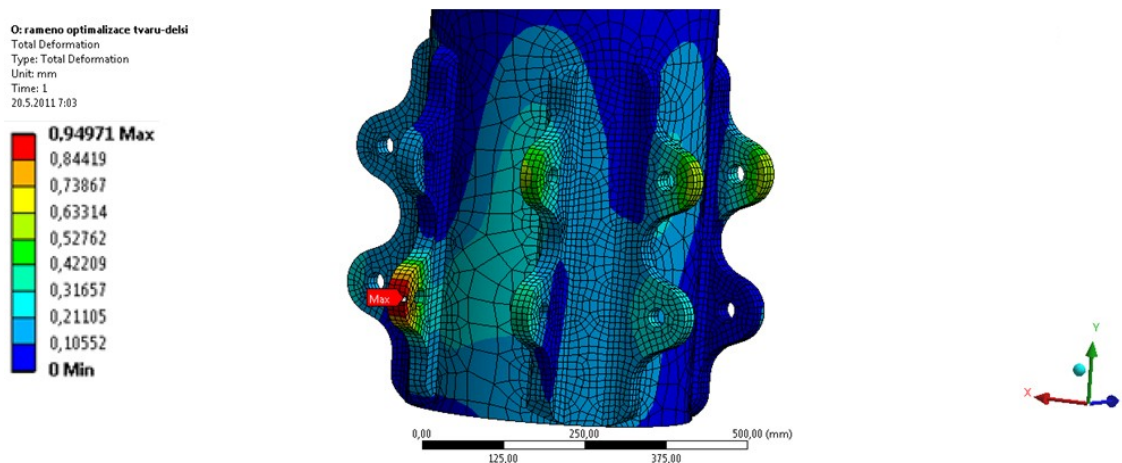
Obrázek 5.61 - průběh posunutí v návrhu uchycení č. 4; [mm]

Na obrázku 5.62 je znázorněn průběh redukovaného napětí. Červená pole značí překročení referenční hodnoty napětí. Je patrné, že došlo k razantnímu snížení napětí. Hodnota 632 MPa je stále příliš vysoká.



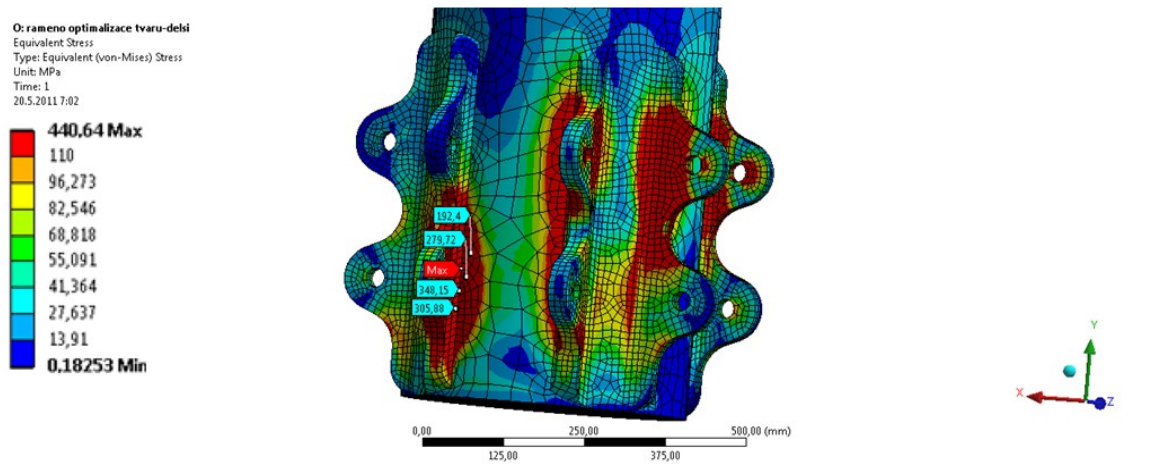
Obrázek 5.62 - průběh napětí v návrhu uchycení č. 4; [MPa]

Vzhledem ke stále vysokým hodnotám napětí, a to zejména v místě přechodu držáku do kyvného ramene, byla tato styčná plocha prodloužena (viz obrázek 5.63). Maximální hodnota celkového posunutí je 0,9 mm v místě označeném nápisem Max.



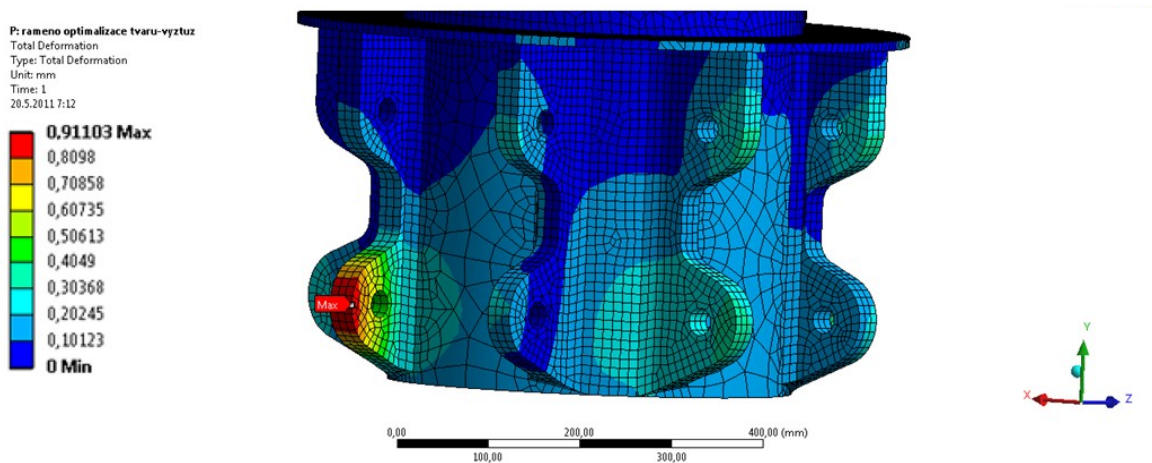
Obrázek 5.63 - průběh posunutí v návrhu uchycení č. 5; [mm]

Z obrázku 5.64 vidíme, že došlo ke zlepšení průběhu a snížení velikosti redukovaného napětí, avšak ne tolik výraznému, hodnota 441 MPa je stále příliš vysoká.



Obrázek 5.64 - průběh napětí v návrhu uchycení č. 5; [MPa]

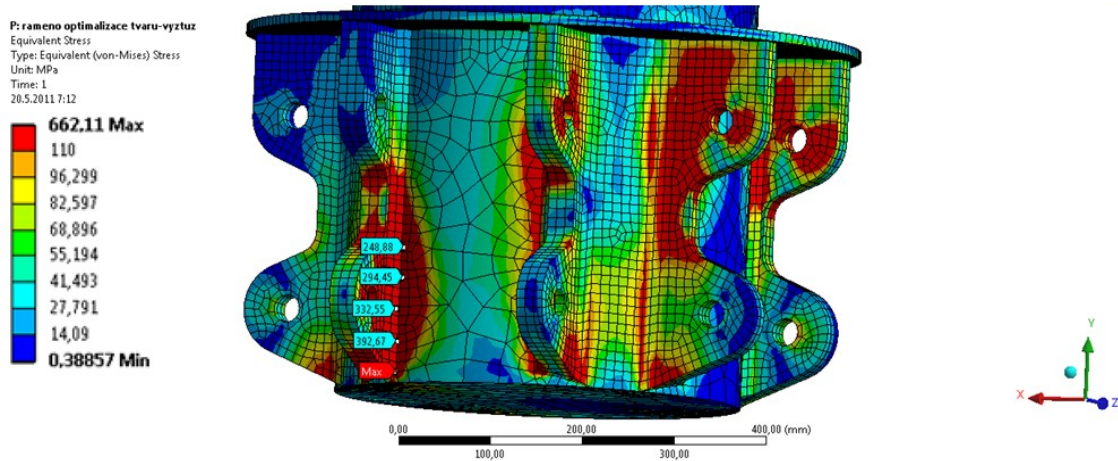
Na obrázku 5.65 byl návrh č. 4 modifikován. Byla přidána výztuha a prodloužena vrchní část úchytu. Kyvné rameno bude i ve skutečnosti opatřeno výztuhou, ke které se připevní velkorozměrové radiálně-axiální ložisko. Průběh celkového posunutí je znázorněn na obrázku 5.65, hodnota maximálního celkového posunutí je 0,9 mm v místě označeném nápisem Max.



Obrázek 5.65 - průběh posunutí v návrhu uchycení č. 6; [mm]

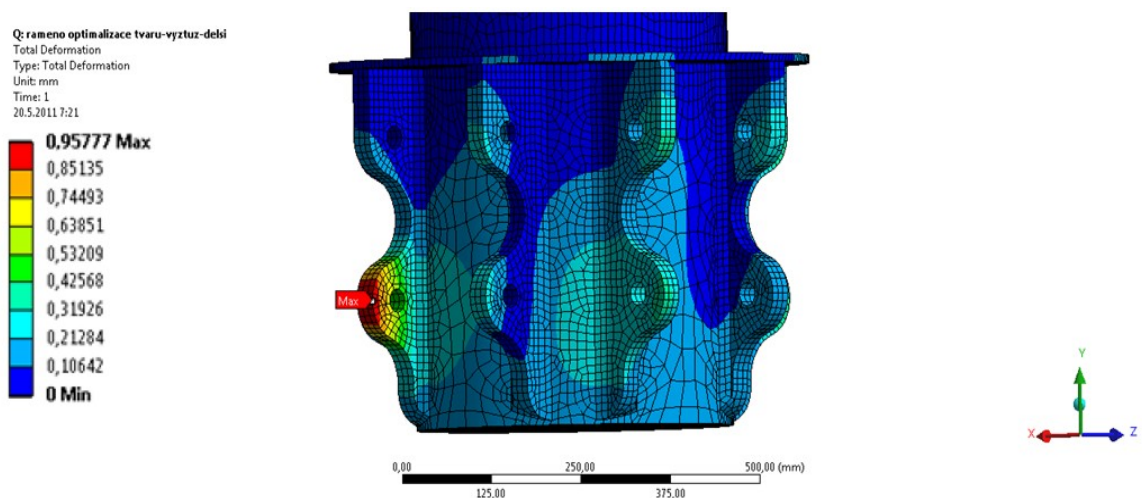


Průběh napětí na obrázku 5.66 znázorňuje překročení zvolené referenční hodnoty redukovaného napětí 110 MPa. Napětí je překročeno v horní části držáku a také ve spodní části držáku v místě přechodu do kyvného ramene.



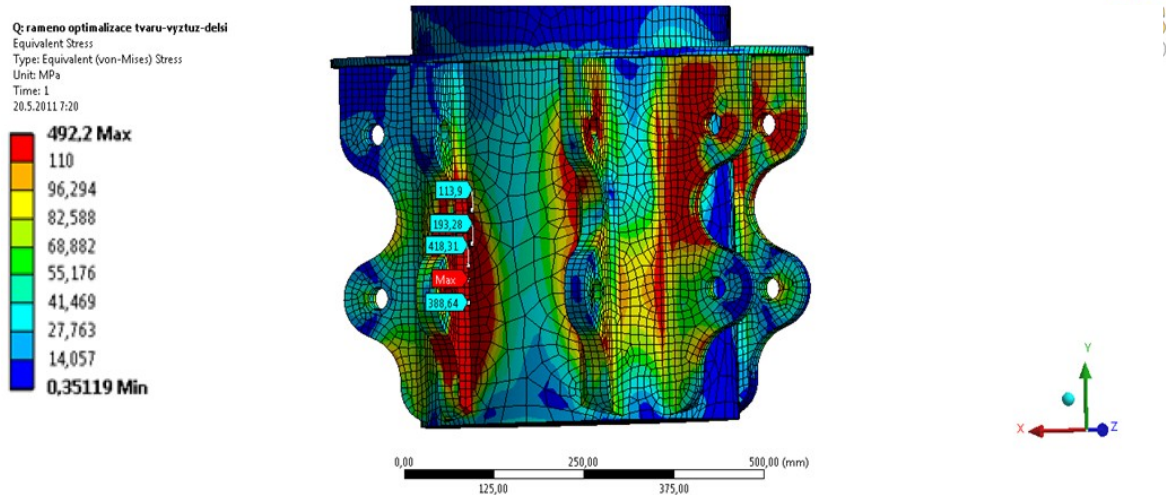
Obrázek 5.66 - průběh napětí v návrhu uchycení č. 6; [MPa]

Na obrázku 5.67 byl návrh č. 5 modifikován. Byla přidána výztuha a prodloužena vrchní část úchytu. Kyvné rameno bude i ve skutečnosti opatřeno výztuhou, ke které se připevní velkorozměrové radiálně-axialní ložisko. Průběh celkového posunutí je znázorněn na obrázku 5.67, hodnota maximálního celkového posunutí je 1 mm v místě označeném nápisem Max.



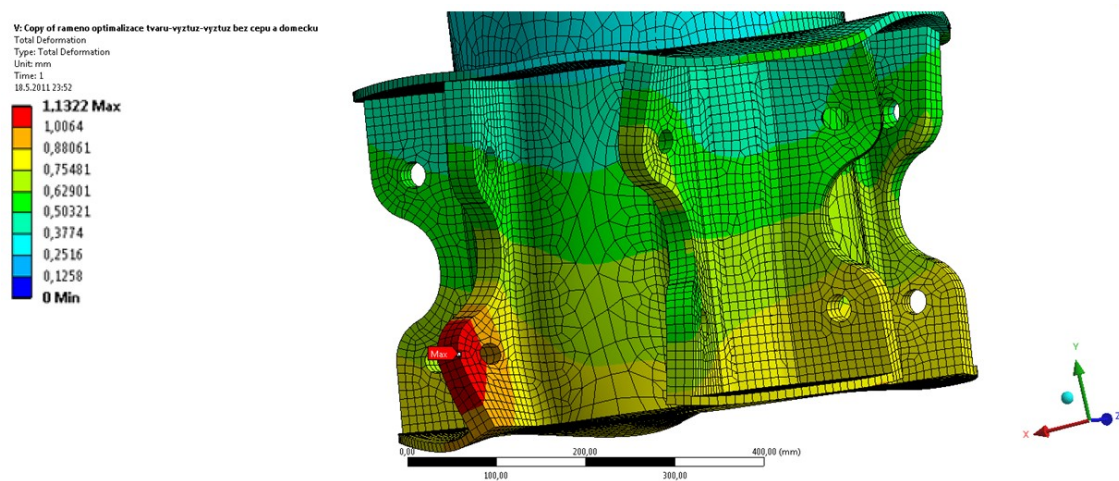
Obrázek 5.67 - průběh posunutí v návrhu uchycení č. 7; [mm]

Průběh redukovaného napětí na obrázku 5.68 znázorňuje překročení zvolené referenční hodnoty redukovaného napětí 110 MPa, v horní i spodní části držáku, v místě přechodu do kyvného ramene.



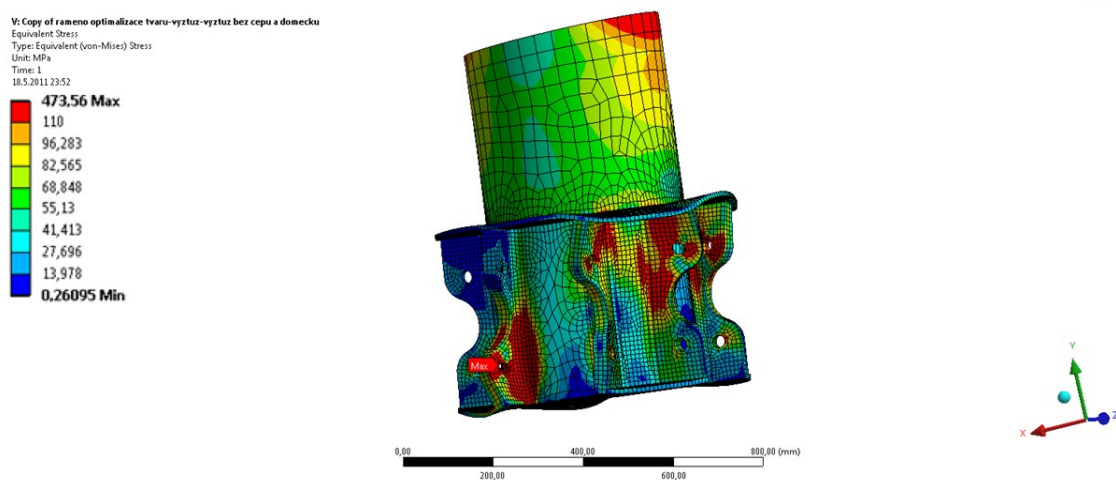
Obrázek 5.68 - průběh napětí v návrhu uchycení č. 7; [MPa]

Na obrázku 5.69 byl návrh č. 7 dále modifikován. Byla přidána výztuha ve spodní části kyvného ramene. Kyvné rameno bude i ve skutečnosti opatřeno vrchní výztuhou, ke které se připevní velkorozměrové radiálně-axiální ložisko. Přidání spodní výztuhy také nic nebrání, veškerá funkčnost kloubového mechanismu bude zachována. Průběh celkového posunutí je znázorněný na obrázku 5.69, hodnota maximálního celkového posunutí je 1,1 mm v místě označeném nápisem Max.



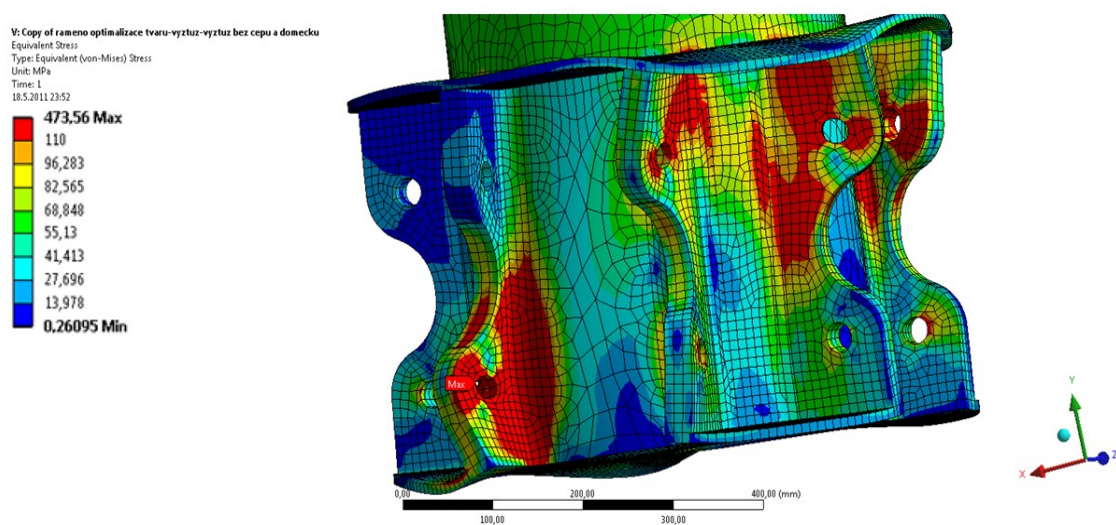
Obrázek 5.69 - průběh posunutí v návrhu uchycení č. 8; [mm]

Z náhledu průběhu redukovaného napětí na obrázku 5.70 vidíme celkové rozložení napětí s jeho maximální hodnotou 474 MPa, v místě označeném nápisem Max.



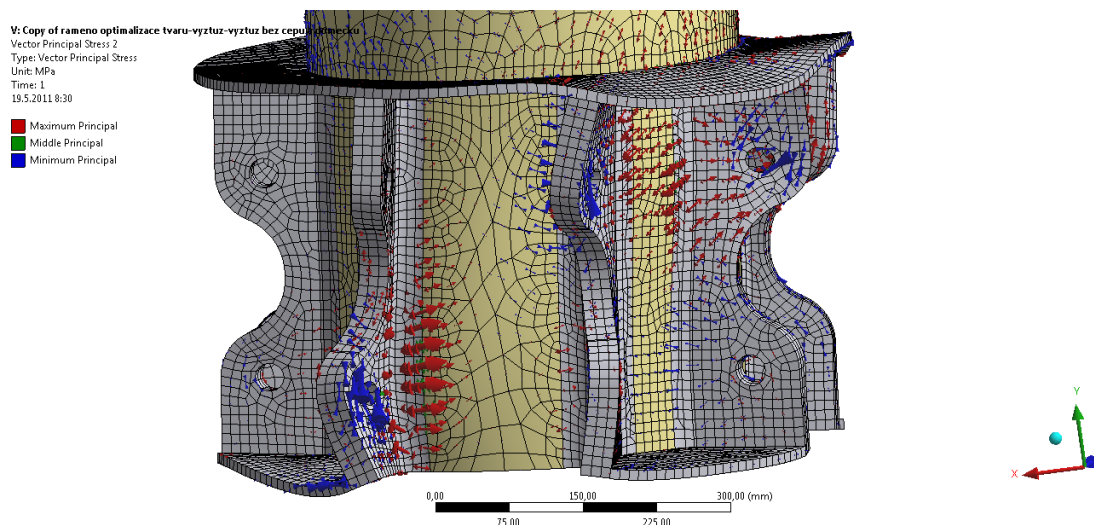
Obrázek 5.70 - průběh napětí v návrhu uchycení č. 8; [MPa]

Z detailu průběhu napětí (viz obrázek 5.71) vidíme překročení referenční hodnoty redukovaného napětí 110 MPa v červeně zbarvených oblastech. Hodnota byla překročena o 364 MPa.



Obrázek 5.71 – detail průběhu napětí v návrhu č. 8; [MPa]

Na obrázku 5.72 je vykreslen směr hlavních napětí. Maximální hodnota je znázorněna červenou barvou a značí tah, kdežto modrá barva znamená minimální hodnotu a značí tlak.



Obrázek 5.72 - rozbor napětí v návrhu uchycení č. 8

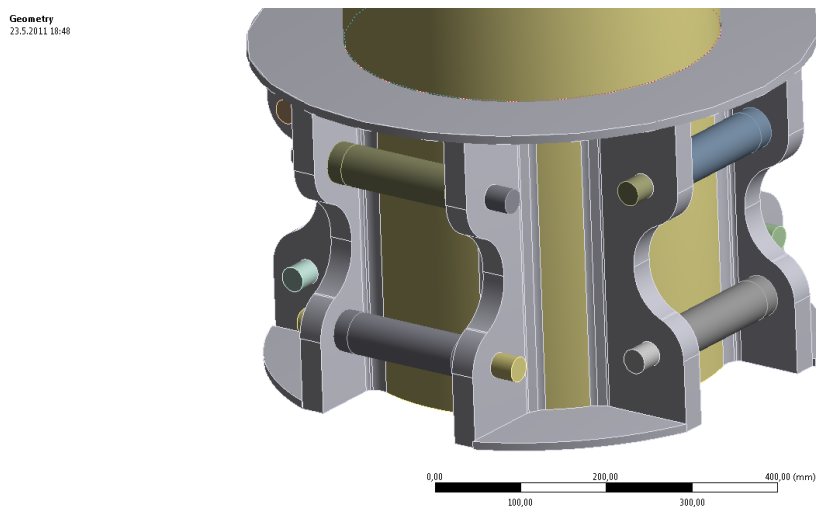
## 5.9 Konečný návrh uchycení gondol ke kyvnému rameni

Bylo rozhodováno mezi dvěma návrhy. V úvahu přicházel návrh č. 5 a návrh č.8. Jelikož i reálná konstrukce uchycení bude obsahovat přírubu, bylo náhlednou k tomuto faktu, a proto byl zvolen návrh č. 8 jako konečný.

Vzhledem ke skutečnosti, že uchycení gondol je provedeno pomocí čepů, které jsou zasunuty v domečcích, budou i tyto součásti vymodelovány.

### 5.8.1 Geometrický model

Výpočtový model byl vytvořen jako prostorový (viz obrázek 5.73).

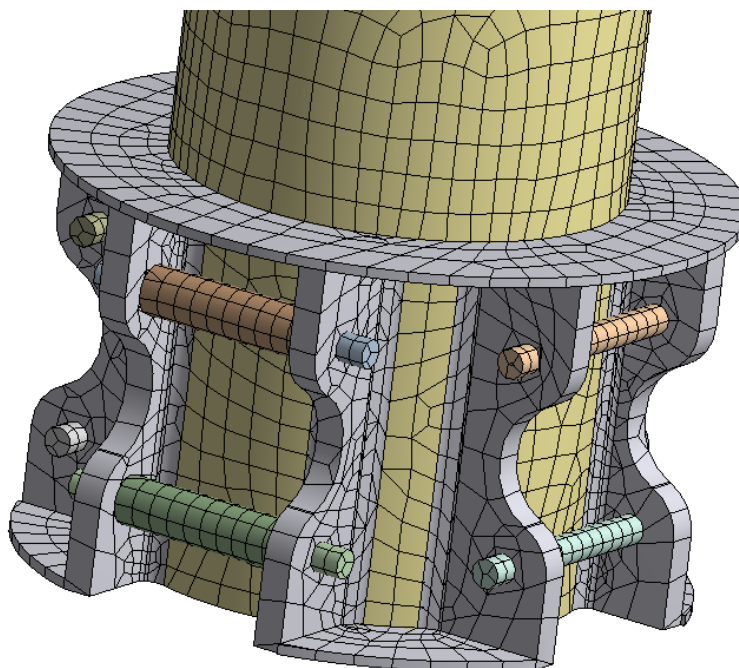


Obrázek 5.73 – geometrický model



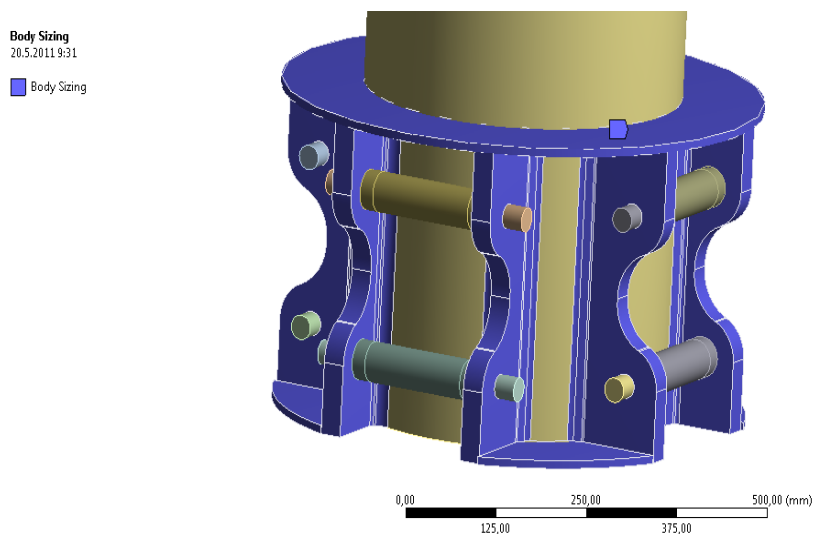
## 5.8.2 Diskretizace modelu

Na geometrickém modelu byla vygenerována síť (viz obrázek 5.74).



Tabulka 5.74 - diskretizovaný návrh uložení

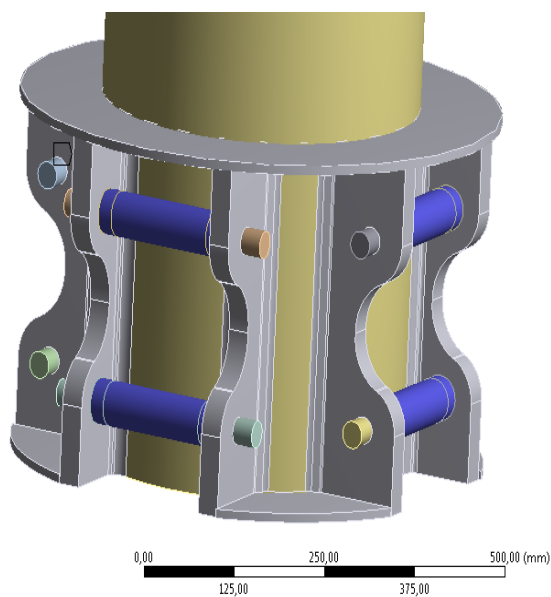
Jelikož vygenerovaná síť byla příliš hrubá (viz obrázek 5.74), dosažené výsledky by byly nepřesné, proto je zapotřebí síť ve vybraných částech zjemnit. Zjemnění sítě tělesa držáku je znázorněno na obrázku 5.75, zjemnění sítě těles domečků je znázorněno na obrázku 5.76 a zjemnění sítě čepů je znázorněno na obrázku 5.77. náhled vygenerované sítě po zjemnění je zobrazen na obrázku 5.78.



Obrázek 5.75 - zjemnění sítě v místě držáků

Body Sizing 2  
20.5.2011 9:31

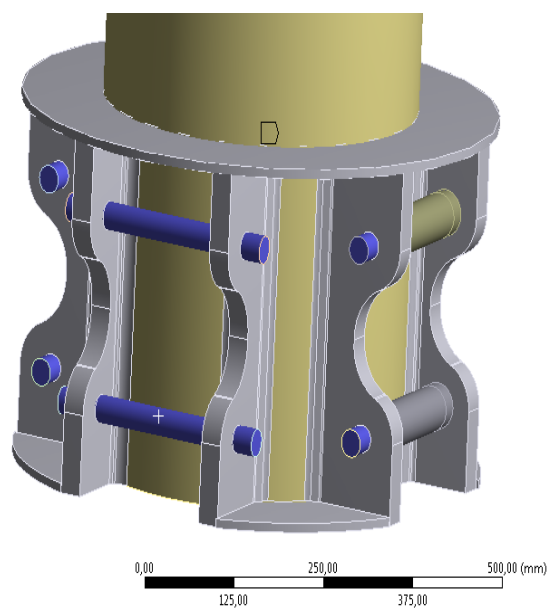
Body Sizing 2



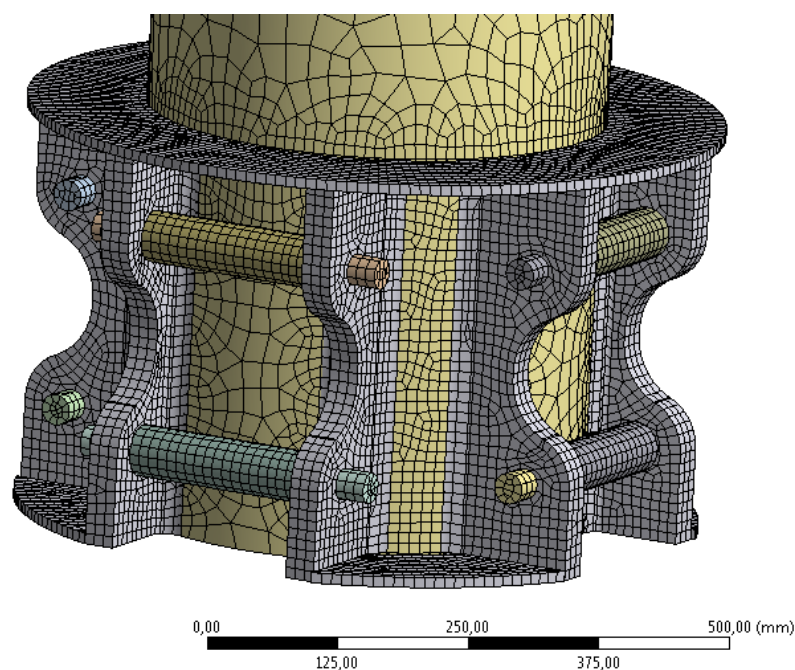
Obrázek 5.76 - zjemnění síť domečků

Body Sizing 3  
20.5.2011 9:32

Body Sizing 3



Obrázek 5.77 - zjemnění síť čepů



Obrázek 5.78 -zjemněný diskretizovaný návrh uchycení

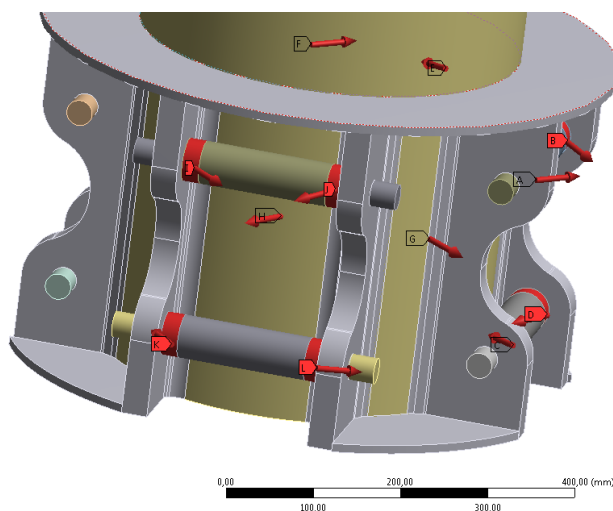
Počet stupňů volnosti konečnoprvkového modelu byl **1 313 160**.

### 5.8.3 Zatížení

Zatížení bylo provedeno pomocí sil. Velikosti těchto sil byly zjištěny z analýzy při výchylce  $120^\circ$ . Všechny síly byly aplikované na vnější plochy domečků (viz obrázek 5.79).

R: rameno optimalizace tvaru-vyztuz-vyztuz  
Force 16  
Time: 1,1  
Items: 10 of 12 indicated  
23.5.2011 18:53

A Force: 2,4001e+005 N  
B Force 2: 2,5322e+005 N  
C Force 3: 1,8815e+005 N  
D Force 4: 2,5061e+005 N  
E Force 5: 2,4466e+005 N  
F Force 6: 2,2107e+005 N  
G Force 7: 1,5042e+005 N  
H Force 8: 2,7045e+005 N  
I Force 13: 2,0237e+005 N  
J Force 14: 2,2333e+005 N

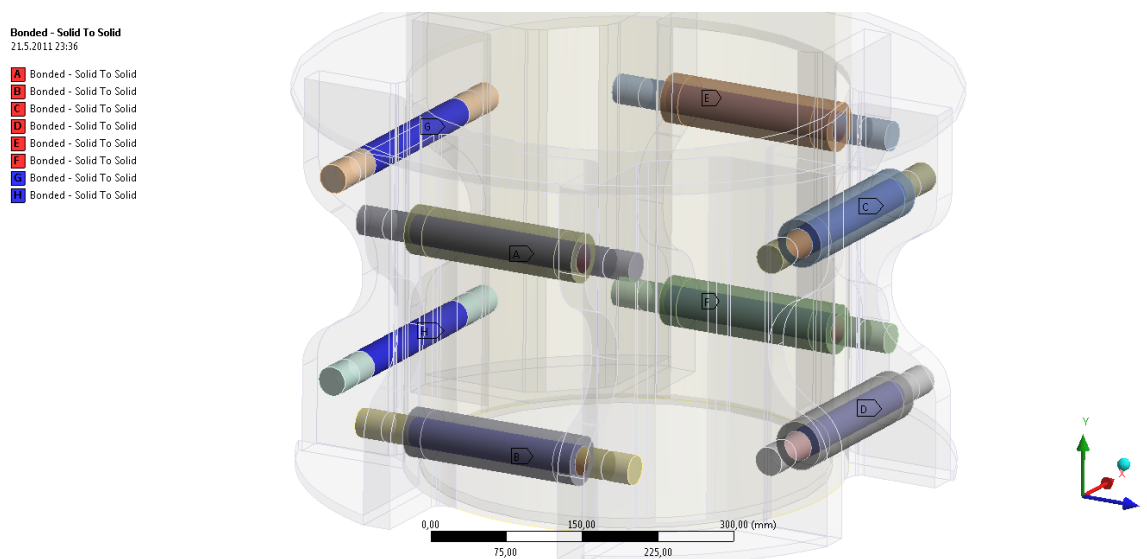


Obrázek 5.79 – zadání zatížení silami

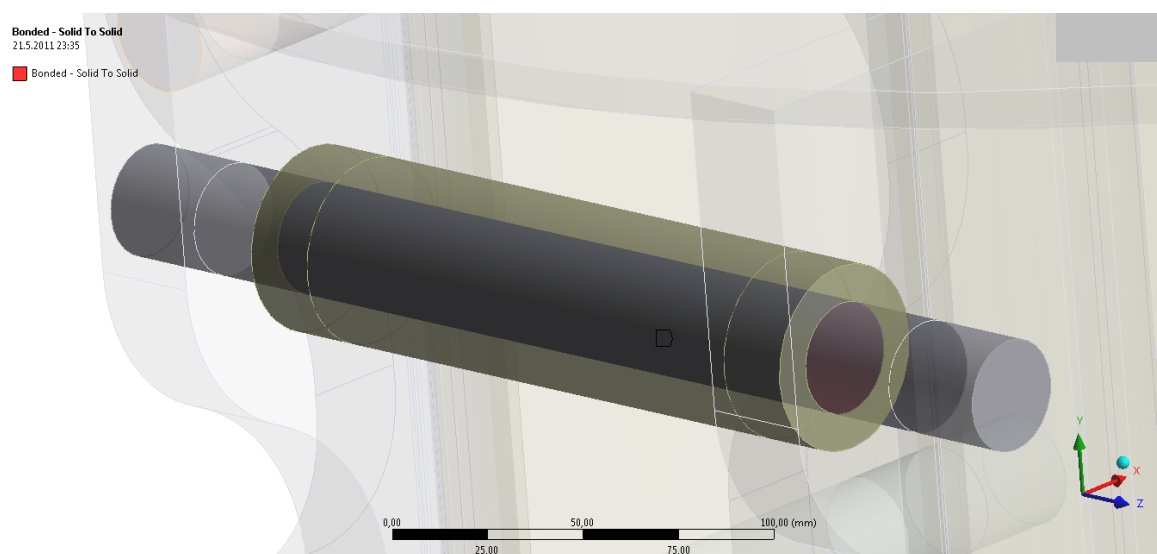
### 5.8.4 Okrajové podmínky

K zabránění všech posuvů a rotací byl model vetknut na modře vyznačenou plochu (viz obrázek 5.54)

Jelikož byly do návrhu uchycení č. 9 zakomponovány čepy a domečky, byly vzhledem k této skutečnosti mezi těmito prvky nadefinovány pevné kontakty (viz obrázek 5.80 a 5.81). Čepy byly pro výpočet spojeny s držákem jako jedna část.



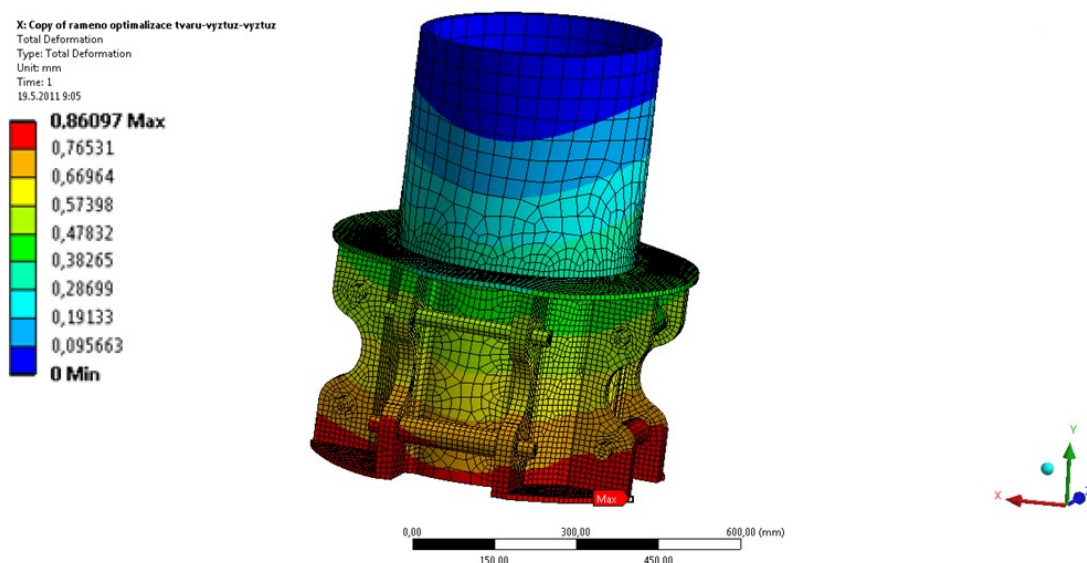
Obrázek 5.80 – náhled pevných kontaktů



Obrázek 5.81 – detail pevného kontaktu

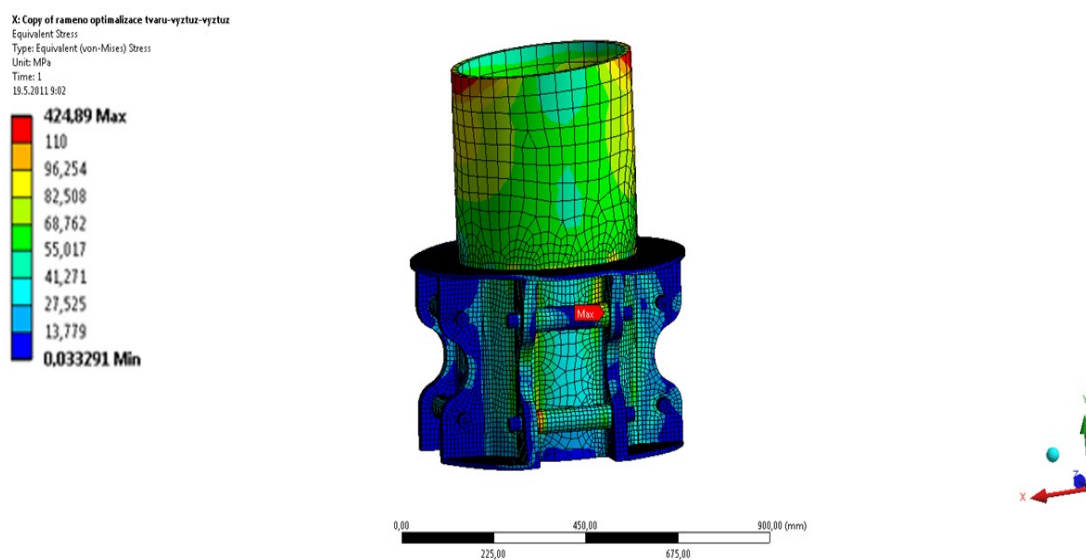


Průběh celkového posunutí návrhu uchycení č. 9 je patrný z obrázku 5.82. Maximální hodnota posunutí je 0,9 mm v místě označeném nápisem Max.



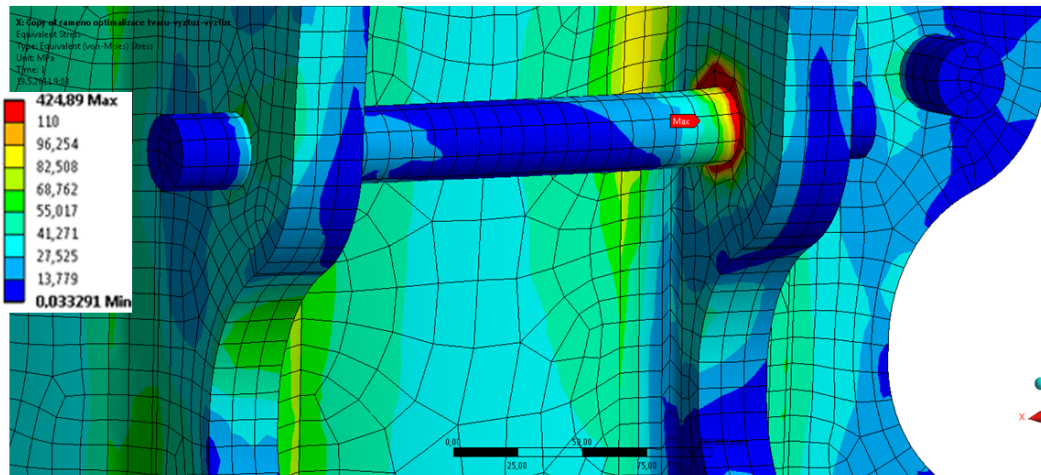
Obrázek 5.82 - průběh posunutí v návrhu uchycení č. 9; [mm]

Z náhledu průběhu redukovaného napětí na obrázku 5.83 vidíme celkové rozložení napětí s jeho maximální hodnotou 425 MPa, v místě označeném nápisem Max.

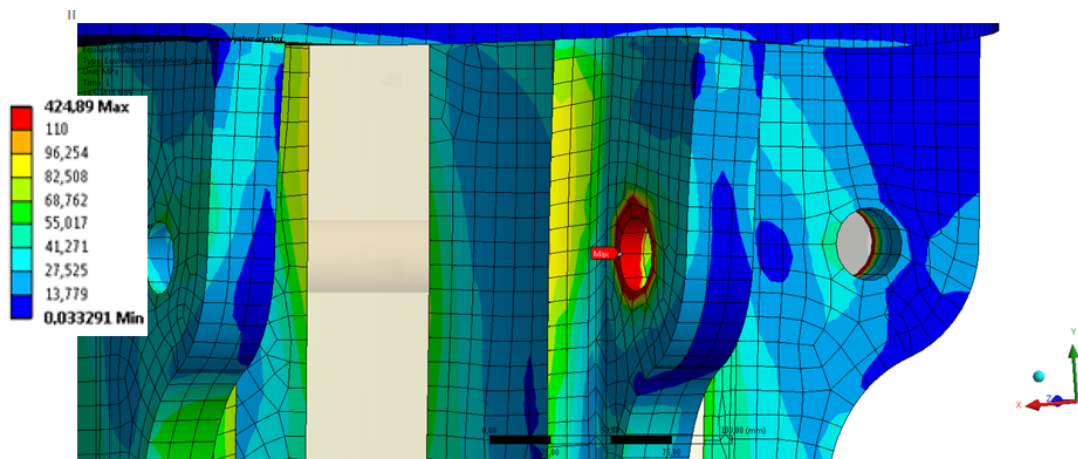


Obrázek 5.83 - průběh napětí v návrhu uchycení č. 9; [MPa]

Pro názornější interpretaci výsledků je vyobrazeno místo s největší hodnotou redukovaného napětí. Z obrázku byl zakryt domeček (viz obrázek 5.84).a posléze i čep (viz obrázek 5.85). Jasně vidíme, že v místě největšího napětí dochází k singularitě, proto je důležité brát v úvahu výsledky vzdálené tomuto singulárnímu místu, kde se dá předpokládat správné nebo jen nepatrně ovlivněné výsledky. Ve skutečnosti k této singularitě nebude docházet, neboť žádná hrana není ve skutečnosti ideálně ostrá, vždy je aspoň nepatrně zaoblená. Ve větší vzdálenosti hodnota napětí je 102 MPa.

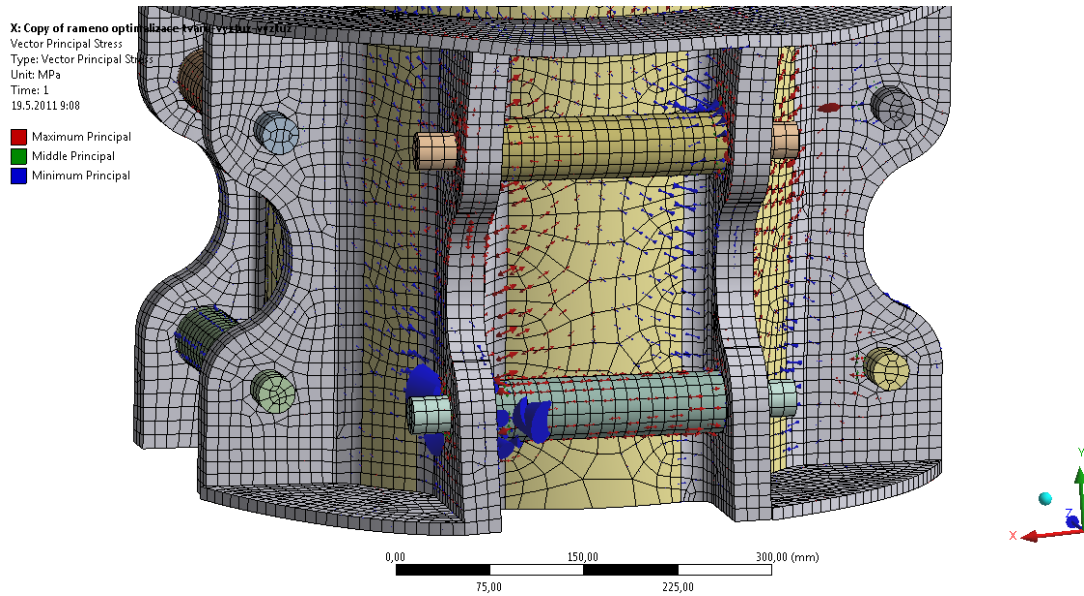


Obrázek 5.84 - detail průběhu napětí v návrhu uchycení č. 9; [MPa]

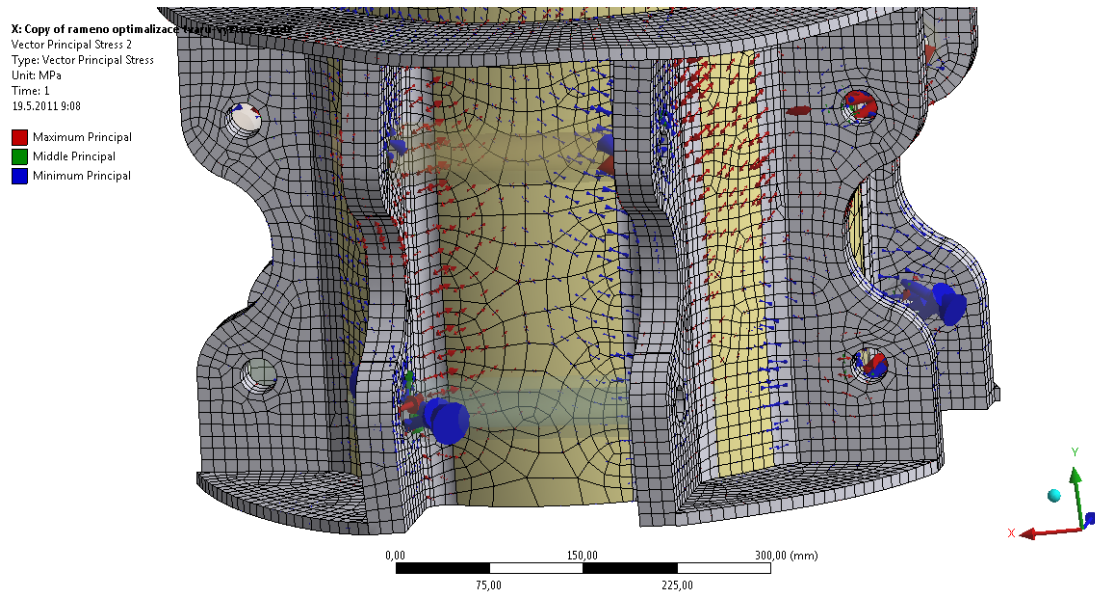


Obrázek 5.85 - detail průběhu napětí v návrhu č. 9; [MPa]

Na obrázcích 5.86, 5.87 a 5.88 jsou vykresleny směry hlavních napětí. Maximální hodnota je znázorněna červenou barvou a značí tah, kdežto modrá barva znamená minimální hodnotu a značí tlak.

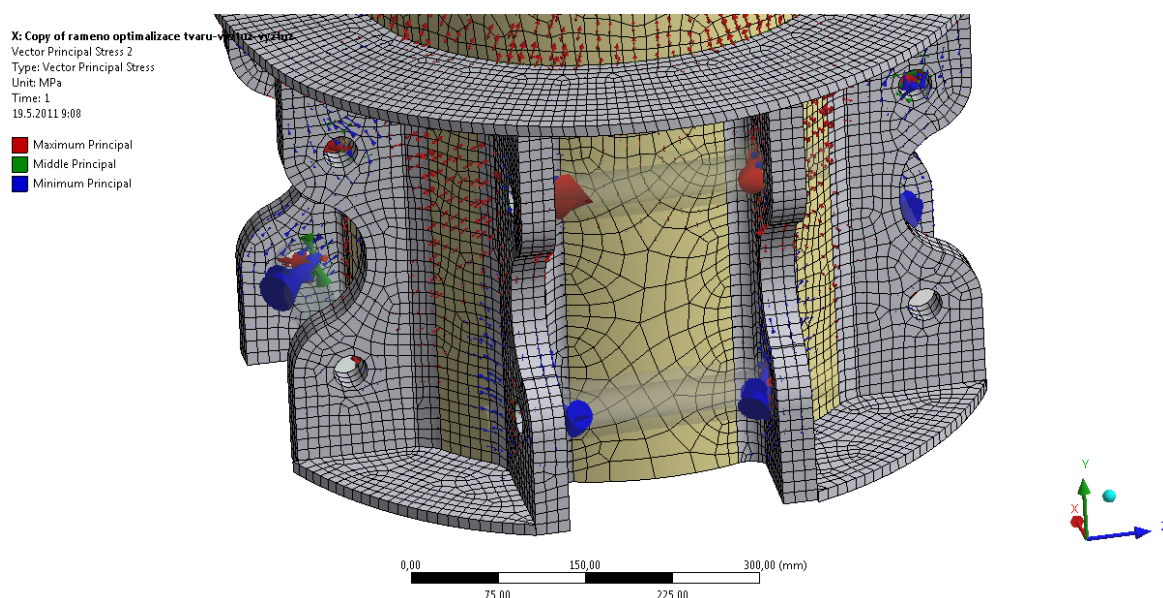


Obrázek 5.86 – rozbor napětí v návrhu uchycení č. 9



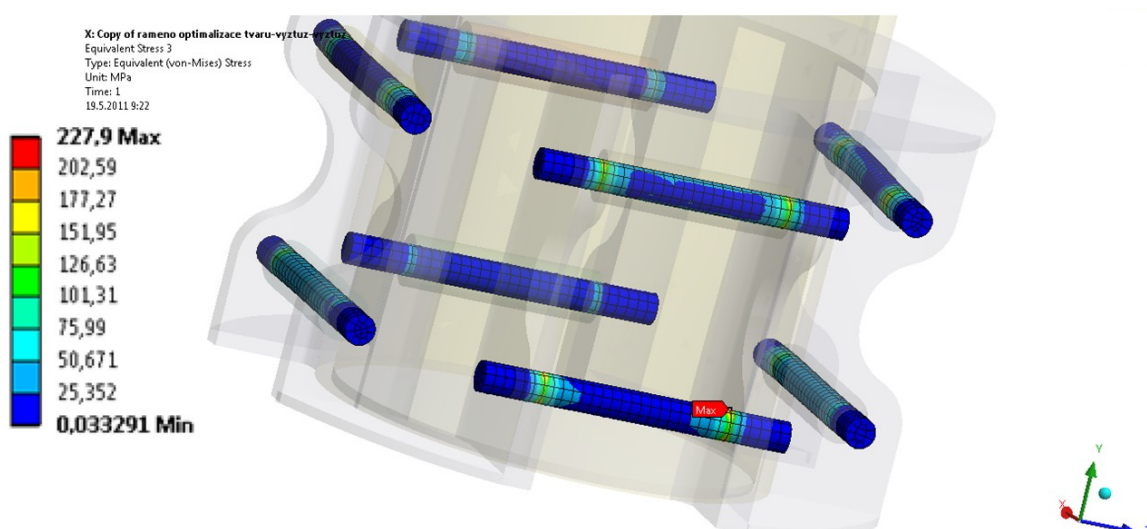
Obrázek 5.87 – rozbor napětí v návrhu uchycení č. 9

Z obrázku 5.88 je patrné, že těleso držáku je namáháno tlakem i tahem, toto však ve skutečnosti není zcela relevantní výsledek, neboť spojení čepu s dírou v reálné konstrukci nepřenáší tah, ale pouze tlak. Na obrázku 5.88 je znázorněno exponované místo s největším namáháním.



Obrázek 5.88 - rozbor napětí v návrhu uchycení č. 9

Průběh redukovaného napětí v čepích je zobrazen na obrázku 5.89. Maximální hodnota napětí 228 MPa je nižší než mez kluzu oceli 11 600. Součást tedy vyhovuje pevnostní podmínce.



Obrázek 5.89 - průběh napětí v čepích; [MPa]

### 5.10 Zhodnocení výsledků prostorového modelu uchycení gondol ke kyvnému rameni

Při porovnání výsledku z návrhu č. 8 a z návrhu č. 9 vidíme, že se přítomnost čepů a domečků výrazně projevila na průběhu a velikosti redukovaného napětí, proto se dá předpokládat, že by se na průběh redukovaného napětí obdobně projevila i nosná ramena. Vzhledem k ostré hraně (viditelné okolo otvoru na obrázku 5.85), která se projevila jako singulární místo, je zapotřebí brát v úvahu výsledky z místa vzdálenějšího od tohoto otvoru. Hodnota maximálního redukovaného napětí podle metody HMM je 102 MPa, koeficient bezpečnosti při porovnání k mezi únavy v ohybu je tedy roven hodnotě 1,67. Napětí v čepích má hodnotu 228 MPa, vzhledem k mezi pevnosti materiálu čepů je hodnota bezpečnosti 1,3. K názornějšímu a přehlednějšímu prezentování výsledků, byly získané hodnoty zapsány do tabulky (viz tabulka 5.5).

	<b>Celkové posunutí; [mm]</b>	<b>Redukované napětí; [MPa]</b>
Návrh č. 1	4,3	7 495
Návrh č. 2	2,3	5 579
Návrh č. 3	2,6	5 515
Návrh č. 4	0,8	632
Návrh č. 5	0,9	441
Návrh č. 6	0,9	663
Návrh č. 7	1	493
Návrh č. 8	1,1	474
Návrh č. 9	0,9	102

Tabulka 5.5 – srovnání výsledků

## Závěr

Bakalářská práce se zabývala pevnostní a tuhostní kontrolou klece zábavního zařízení. V teoretické části bylo vysvětleno, v čem spočívá podstata metody konečných prvků, dále byly objasněny pojmy jako prvek, uložení, zatížení a stupeň volnosti. Také byly rozebrány jednotlivé oblasti (jednorozměrná, dvojrozměrná, prostorová) a uvedeny příklady jednotlivých typů prvků spadajících do příslušných oblastí. Dále byly také vysvětleny pojmy lokální a globální matice tuhosti, objasněny jednotlivé rozdíly mezi těmito maticemi a vysvětlen princip, pomocí kterého se jednotlivé lokální matice zakomponují do globální matice tuhosti. Dále byly sepsány rovnice nutné pro řešení úlohy pro rovinný trojúhelníkový prvek a pro prostorový čtyřstěnný prvek.

V kapitole 5 byl proveden pevnostní a tuhostní výpočet klece zábavního zařízení, Byla provedena modální analýza (viz kapitola 5.5) a výsledky této analýzy jsou zapsány v tabulce 5.1. Následně byla provedena samotná pevnostní kontrola klece zábavního zařízení při různých výchylkách. Celkové zhodnocení bylo provedeno v kapitole 5.7 a výsledky napětí v jednotlivých součástech konstrukce zábavního zařízení zapsány do tabulky 5.2. V tabulce 5.3 jsou zapsány jednotlivé výsledky celkových posunutí konstrukce. V tabulce 5.4 jsou porovnány hodnoty dovolených a vypočtených napětí a také zapsány jednotlivé koeficienty bezpečnosti pro jednotlivé součásti.

Vzhledem ke stanovení uchycení gondol ke kyvnému rameni jako kritické místo, bylo toto analyzováno v kapitole 5.8, kde bylo navrženo několik odlišných návrhu uložení (viz obrázky 5.53 až 5.88). Jednotlivé hodnoty napětí a posunutí byly zapsány do tabulky 5.5 Vzhledem k velikosti redukovaného napětí na návrhu č. 5 a návrhem č. 8 bylo rozhodováno mezi těmito dvěma variantami uchycení gondol ke kyvnému rameni. V důsledku opatření ramena přírubou pro radiálně-axiální ložisko (odpovídá skutečnosti), byl vybrán návrh č.8. Tento návrh byl dále zpracován a doplněn o samotné čepy a domečky čepů. Průběh napětí na tomto návrhu je znázorněn na obrázcích 5.83 až 5.88. Koeficient bezpečnosti v jednotlivých součástech klece zábavního zařízení byl v rozmezí 1,25 – 4,2, vzhledem k mezi únavy jsou tyto hodnoty dostačující.



## Seznam použité literatury

- [1] ANSYS, Inc. *ANSYS Release 12.0 Documentation* . 2009. Dostupné v elektronické podobě jako součást softwaru ANSYS 12.0.
- [2] COOK, D. *Finite Element Modeling for Stress Analysis*. 1st printing. United States of America: John Wiley & sons, Inc., 1995. 320 s. ISBN 0-471-10774-3.
- [3] ČSN EN 13814 - *Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky - BEZPEČNOST*. Praha: ČNI, 2005. 180 s.
- [4] HANÁK, J., *Pevnostní výpočet nosného ramene zábavního zařízení: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2011, 74 s.
- [5] KOLÁŘ, V; NĚMEC, I.; KANICKÝ, V. *FEM - Principy a praxe metody konečných prvků*. 1. vyd. Praha: Computer Press, 1997. 401 s. ISBN 80-7226-021-9.
- [6] LEINVEBER J., VÁVRA P. *Strojnické tabulky*. 2.vyd. Úvaly: Albra, 2005. 908 s. ISBN 80-7361-011-6.
- [7] LENERT, J. *Úvod do metody konečných prvků*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 1995. 110 s. ISBN 80-7078-686-8.
- [8] VINOGRADOV, O. *Fundamentals of Kinematics and Dynamics of Machines and Mechanisms*. London: CRC Press, 2000. ISBN 0-849-3025-79.